



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNIA

**“ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA ESTABILIDAD DE LA
LADERA DERECHA SOBRE EL VERTEDERO DE LA PRESA DE
LA CENTRAL MAZAR”**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
GEOLOGÍA APLICADA Y
GEOTÉCNIA**

AUTOR: ING. JUAN PABLO ARÉVALO FIGUEROA

DIRECTOR: ING. JAIME ASDRUBAL BOJORQUE IÑEGUEZ. PhD.

**Cuenca, Ecuador
Septiembre, 2014**



RESUMEN

En el análisis de taludes por equilibrio límite es común establecer el factor de seguridad como indicador de estabilidad, siendo determinado por la relación entre las fuerzas y/o momentos resistentes versus las actuantes. El análisis, generalmente, considera las capas del suelo y/o macizo rocoso como homogéneas y con parámetros geotécnicos constantes. En cambio, el análisis probabilístico, considera la incertidumbre en la determinación de parámetros geotécnicos asumidos y la heterogeneidad natural que tienen los macizos rocosos.

El talud analizado está ubicado junto al vertedero de la presa de la central Hidroeléctrica Mazar, en la provincia del Azuay. Esta central es parte del Proyecto Hidroeléctrico Paute Integral, que es considerado estratégico para el desarrollo del Ecuador.

El talud se caracterizó con datos obtenidos previo a la construcción de la presa y del monitoreo realizado posterior a la construcción. Los criterios aplicados para el análisis de estabilidad del talud son que: el plano de rotura se desarrolla en el macizo rocoso, la falla es de tipo planar y obedece al criterio de rotura de Mohr Coulomb. En el análisis probabilístico, se variaron los parámetros geotécnicos de fricción interna y cohesión de la roca.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la importancia que tiene la variación de los parámetros mecánicos del terreno y la distribución muestral en el análisis de estabilidad de taludes. Con los análisis de estabilidad realizados se concluye que la probabilidad de que el talud cumpla con el factor de seguridad de diseño, es decir, mayor a 1,3, es de 99.94%.

Palabras Claves:

Estabilidad, Análisis Probabilístico, Central Hidroeléctrica Mazar, Equilibrio Límite, Mohr Coulomb, Morgenstern Price, Azuay.



ABSTRACT

The analysis of slopes for balance limit it is common to set the safety factor as an indicator of stability, being determined by the relationship between the forces and / or resistant moments versus the acting. Generally the analysis considers the layers of soil and / or mass rock as homogeneous and geotechnical parameters constant. Instead, the probabilistic analysis, considers the uncertainty in the determination of geotechnical parameters assumed and the natural heterogeneity that rock masses have.

Based on the slope analysis using limit equilibrium, it is common to establish the safety factor as the stability indicator, which is determined by the relation between forces and /or resistant moments versus acting forces. The analysis, generally, considers the layers of the soil and/or rock mass as homogenous and with constant geotechnical parameters. However, the probabilistic analysis, considers the uncertainty in determining assumed geotechnical parameters, and the natural heterogeneity that rock mass contains.

The analyzed slope is located near the Mazar Hydroelectric dumping ground, in Azuay province. This power plant is part of Paute's Integral Hydroelectric Project, which is fundamental for Ecuador's development.

The slope was typified with data obtained prior the damn construction as well as from monitoring done after the construction. The criteria applied for the slope stability analysis are as follows: the rupture takes place in the rock mass, geological fault has a planar origin, and it is based on the Mohr Coulomb criterion. On the probabilistic analysis, geotechnical parameters of internal friction and rock cohesion were varied.

The results highlight the importance the variation of mechanical parameters of the ground and the sample distribution has on the slope stability analysis. The stability analysis showed that the probability for the slope to meet the safety design factor, i.e. greater that 1.3, is 99.94%.



INDICE

ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA ESTABILIDAD DE LA LADERA DERECHA SOBRE EL VERTEDERO DE LA PRESA DE LA CENTRAL MAZAR

Listado de Anexos:	6
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
1.1 Antecedentes y justificación:	10
1.2 Delimitación de la zona de estudio.....	12
1.3 Situación actual del talud en el vertedero de la presa Mazar	13
1.4 Trabajos realizados en la ladera derecha sobre el vertedero de la presa de la Central Mazar	14
1.5 Objetivo de la investigación.....	15
1.6 Estructura de la Tesis.....	15
CAPÍTULO II: GEOLOGÍA Y GEOTECNIA.....	17
2.1 Introducción.....	17
2.2 Geología.....	17
2.3 Geomorfología.....	19
2.4 Tectónica.....	20
2.5 Sismicidad y volcanismo	24
2.6 Litología y estratigrafía	25
2.7 Geología estructural	34
2.8 Conclusiones del Capítulo II.....	35
CAPÍTULO III: MONITOREO DEL TALUD SOBRE EL VERTEDERO DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MAZAR	36
3.1 Introducción.....	36
3.2 Extensómetros	37
3.3 Piezómetro cuerda vibrante	37
3.4 Inclínómetros	39
3.5 Controles topográficos	40
3.6 Conclusiones Capítulo III	44
CAPÍTULO IV: PARAMETROS HIDROLÓGICOS, GEOTÉCNICOS Y MODELIZACIÓN DEL TALUD	45
4.1 Introducción.....	45



4.2 Parámetros hidrológicos.....	45
4.2 MODELIZACION DEL TALUD	46
4.2.2 Parámetros geotécnicos.....	49
4.3 Conclusiones Capítulo IV	53
CAPITULO V: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	55
5.1 Introducción.....	55
5.2 Análisis de estabilidad probabilístico.....	63
5.3 Cálculo de probabilidades del Factor de Seguridad	92
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
Referencia bibliográfica:	96
ANEXOS:	97
Anexo No. 01	98
Anexo No. 02	100
Anexo No. 03	102
Anexo No. 04	104
Anexo No. 05	106
Anexo No. 06	108
Anexo No. 07	110
Anexo No. 08	112
Anexo No. 09	114



Listado de Anexos:

Anexo No. 01 Emplazamiento de la Central Hidroeléctrica Mazar.

Anexo No. 02 Mapa geológico zona Central Hidroeléctrica Mazar

Anexo No. 03 Mapa de ubicación del monitoreo del talud sobre el vertedero de la Central Hidroeléctrica Mazar.

Anexo No. 04 Grafico de registro histórico de piezómetros y relación con el embalse de la Central Hidroeléctrica Mazar.

Anexo No. 05 Ubicación sondeos eléctricos y perfiles sísmicos realizados en prospección geotécnica para los diseños de la Central Hidroeléctrica Mazar.

Anexo No. 06 Perfiles característicos del talud sobre el vertedero considerados en los diseños de la Central Hidroeléctrica Mazar.

Anexo No. 07 Ubicación en planta de perfiles característicos del talud sobre el vertedero considerados en los diseños de la Central Hidroeléctrica Mazar.

Anexo No. 08 Vectores de movimiento, controles topográficos de hitos topográficos colocados en el monitoreo del talud sobre el vertedero de la Central Hidroeléctrica Mazar.

Anexo No. 09 Tabla de Distribución Normal



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, **Juan Pablo Arévalo Figueroa**, autor de la tesis “**ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA ESTABILIDAD DE LA LADERA DERECHA SOBRE EL VERTEDERO DE LA PRESA DE LA CENTRAL MAZAR**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 30 de septiembre del 2014

Juan Pablo Arévalo Figueroa

C.I: 010335262-1



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, **Juan Pablo Arévalo Figueroa**, autor de la tesis “**ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA ESTABILIDAD DE LA LADERA DERECHA SOBRE EL VERTEDERO DE LA PRESA DE LA CENTRAL MAZAR**”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Magister en Geología Aplicada y Geotecnia. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 30 de septiembre del 2014

Juan Pablo Arévalo Figueroa

C.I: 010335262-1



AGRADECIMIENTO

Agradezco a los ingenieros Jaime Bojorque, Julio Robles, Enrique Acosta, Mario Almache y Xavier Tepan porque me brindaron generosamente información y supieron enseñarme con pacientemente durante el desarrollo de la tesis.

DEDICATORIA

A mi esposa, mis hijas y mis padres por ser el eje de mi vida



ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA ESTABILIDAD DE LA LADERA DERECHA SOBRE EL VERTEDERO DE LA PRESA DE LA CENTRAL MAZAR

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y justificación:

En la zona austral de Ecuador, aprovechando su riqueza hídrica y sus condiciones topográficas, se emplazan varios proyectos Hidroeléctricos considerados como estratégicos para el desarrollo nacional. La Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, a través de su unidad de negocio Hidropaute, se encuentra llevando a cabo el desarrollo del Proyecto Paute Integral, que consiste en el aprovechamiento hidroenergético de la cuenca del río Paute, ubicada al sur – este del Ecuador sobre los límites de las Provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago, en los cantones Paute, Guachapala, El Pan, Sevilla de Oro, Palmas, Azogues y Méndez. La central Mazar es parte de estos proyectos estratégicos y está ubicada en la cuenca del Río Paute, coordenadas UTM: 764.567-9.713.199 (eje de presa) [1].

El Proyecto Paute Integral consta del aprovechamiento en cascada formado en la presa y central de generación Mazar (160 Mw), la presa Daniel Palacios y la central de generación Molino (1075 Mw), el Proyecto Sopladora (487 Mw) y el Proyecto Cardenillo (Aprox. 412Mw). Se muestra Mapa del Proyecto Paute Integral en Gráfico No. 1.1



Gráfico No. 1,1: Mapa de Proyecto Hidroeléctrico Paute Integral.
Fuente: <https://www.fiec.espol.edu.ec/GICA-Web/page3.html> [20].

La central Mazar está constituida básicamente por una presa de enrocado con pantalla de hormigón que forma un embalse de 410 Hm³ de volumen total hasta la cota 2153 msnm. El volumen muerto del embalse es capaz de alojar los sedimentos durante una vida útil de 50 años y a pesar de que habrá una reducción del volumen útil, la central podrá continuar operando.

La construcción de la central Mazar se realizó en base a los estudios de Consorcio Gerencia Mazar y la compañía Caminosca (2005) [8] y los diseños ejecutivos realizados durante la construcción, para el caso del talud sobre el vertedero se realizó se desarrolló el Diseño Ejecutivo 2217-MC-V14-002-a [3], en los mismos, se hace una recopilación de varios estudios que datan de los años setenta, ochenta y noventa. Parte importante del estudio de Sweco & Botconsult [1] del año 1998, fue el análisis de la construcción de los vertederos debido a que, para la ejecución de estos, se preveía el realizar importantes volúmenes de excavación, por lo tanto, dentro de las recomendaciones del estudio consta que el diseño de los vertederos se realizó con el afán de no influir



sobre las zonas parcialmente inestables como son la Ermita Norte y Sur. En la central Mazar, técnicos de Hidropaute, monitorean el comportamiento del talud mediante extensómetros, hitos topográficos, piezómetros e inclinómetros, de manera periódica desde el año 2007.

Siendo la Central Hidroeléctrica Paute – Mazar una obra de vital importancia tanto para la regulación de las aguas del Río Paute, como para la generación energética del país, se hace necesario evaluar la estabilidad actual del talud sobre el vertedero y verificar los resultados de estabilidad planteados en el Diseño Ejecutivo 2217-MC-V14-002-a [3], planteando el análisis probabilístico de la estabilidad del talud, mediante la variación los parámetros geotécnicos de cohesión y fricción asumidos en el Diseño Ejecutivo 2217-MC-V14-002-a [3], en base a los cuales se realizó la construcción. El parámetro de cohesión para el estrato de roca fresca de acuerdo a la clasificación RMR varía entre 294 a 392 Kpa, y la fricción interna del mismo estrato varía entre 35 a 45 grados.

1.2 Delimitación de la zona de estudio

El proyecto hidroeléctrico Paute-Mazar está localizado en el Austro Ecuatoriano, en la Cordillera Real, sobre los límites de las provincias de Azuay y Cañar, entre las coordenadas UTM: 764.567-9.713.199 (eje de presa) de las parroquias Rivera y Amaluza en el valle del río Paute. Las bermas de estabilización en la ladera sobre el vertedero se encuentran al Este de la Presa Mazar, es decir, a la margen derecha de la misma. Se trata de un talud de aproximadamente 400 metros de altura, situado junto al vertedero. Para su construcción se excavó la roca formando bancos de 15 m de altura con pendiente 2V:1H, dejando bermas de 8 m de ancho entre cada banco [3]. En el anexo No. 01 se presenta el esquema general de la presa y la ubicación del Talud sobre el vertedero.

En la foto No. 1.1, tomada desde aguas abajo de la presa, se aprecian las bermas sobre el vertedero en la central Mazar



*Foto No.1.1: Vista del talud sobre el vertedero de la central Mazar,
Fuente: <https://www.celec.gob.ec> [21]*

1.3 Situación actual del talud en el vertedero de la presa Mazar

La ladera natural derecha sobre la presa, hasta la cota 2200 msnm, no presenta mayores depósitos coluviales debido a las pendientes abruptas de alrededor de 46° que se incrementa bajo la cota 2100 msnm hasta los 53° . Las laderas se presentan estables [1].

El talud sobre el vertedero está conformado por material rocoso potencialmente inestable debido al proceso de descompresión producido por la excavación de la ladera y el grado de alteración de estas rocas, que en la zona alta del talud, entre las cotas 2400 y 2200 msnm, es de mayor espesor.

Según los sondeos eléctricos verticales SR-9-V, SR-10-V, SR-11V, SR-12-V, SR-13-V y SR-14-V realizados en la capa de roca superficial descompuesta alcanzan los 10 m y se estima que el horizonte de roca descomprimida llega a los 20 m en la parte más alta del talud. Debido a estas condiciones, el nivel de desplante del plinto de la losa perimetral para el vertedero se realizó con excavaciones en roca variables entre 0 m y 13 m bajo el nivel original del



terreno. En este estribo derecho de fuerte pendiente, la roca de fundación se reforzó con pernos de anclaje para evitar el riesgo de volcamiento y rotura de cuñas.

El proceso de inyección de la cortina de impermeabilización inmediatamente debajo del nivel de desplante asegura la indeformabilidad del macizo rocoso y un incremento, no determinado, en sus características de resistencia al corte, en especial en la cohesión [3].

A partir de las condiciones indicadas para la margen derecha de la presa, el Consorcio Gerencia Mazar realizó la construcción y estabilización del talud sobre el vertedero de la presa, y personal de Hidropaute EP realiza el monitoreo permanente con inclinómetros, piezómetros y control topográfico. Sin embargo, no se ha hecho una evaluación de la situación posterior a la construcción, en cuanto a su estabilidad y Factor de Seguridad, comprobando además si los parámetros geotécnicos asumidos han permitido predecir el comportamiento real del Talud.

Ante esto, y respetando las recomendaciones de los estudios de construcción del proyecto [3], es necesario conocer más en detalle el comportamiento y profundidad de los potenciales movimientos del terreno en las zonas delicadas para la central. Para ello se ha analizado la información de piezómetros, extensómetros e inclinómetros en la zona del talud junto al vertedero. Se ha puesto especial atención a los coluviones y/o zonas de roca descomprimida descritas como “Ermita Norte” en los estudios previos a la construcción de Sweco & Botconsult [1] y que están afectados parcialmente por el corte del vertedero. Además, se han hecho corridas de estabilidad asumiendo diferentes parámetros geotécnicos y determinando si se ajustan a la realidad.

1.4 Trabajos realizados en la ladera derecha sobre el vertedero de la presa de la Central Mazar

De acuerdo a lo observado y a la información recopilada por personal de la central Mazar, en la ladera derecha sobre la presa mazar se realizaron trabajos de excavación de material formando taludes cuyo corte es de 15 m de altura y las bermas que tienen 8 m de ancho, el talud se encuentra protegido con malla electro soldada (100X100X6mm) y hormigón lanzado de 10 cm de espesor. Además se instalaron pernos de 12 m de longitud con espaciamientos, tanto en vertical como en horizontal, de 2 m en roca y sobre la cota 2200 msnm pernos cada 1,5 m en el depósito coluvial y roca muy descomprimida, (estos últimos de tipo autopercutor). El material rocoso producto de esta excavación, debido a



que no fue de las características esperadas se desalojó y muy poco se utilizó en el enrocado de la presa.

1.5 Objetivo de la investigación

1.5.1 Objetivo general

El objetivo de la tesis es realizar el análisis probabilístico de la estabilidad de la ladera ubicada sobre el vertedero, situado a la derecha de la Presa de la Central Hidroeléctrica Mazar. Este análisis permitirá: evaluar las predicciones y cálculos de los diseños de Consorcio Gerencia Mazar [3] con las cuales se construyó la central, determinar la estabilidad actual del talud posterior a la construcción y en caso de ser necesario proponer medidas de seguridad adicionales para garantizar la seguridad del talud.

1.5.2 Objetivo específico

- Realizar un análisis de estabilidad probabilístico de los parámetros geológicos y geotécnicos, obtenidos en diferentes estudios realizados para el proyecto Paute Integral, que permiten caracterizar y modelar la estabilidad del talud.
- Analizar y validar las medidas de estabilización que fueron ejecutadas y los parámetros geotécnicos utilizados.
- Sugerir, en caso de requerirse, otra solución y/o soluciones para la estabilidad de la ladera.

1.6 Estructura de la Tesis

El desarrollo de la tesis apunta al análisis probabilístico del comportamiento del factor de seguridad del talud situado sobre el vertedero a la derecha de la presa Mazar. Los diferentes factores de seguridad analizados, se obtienen a partir de la variación de los datos geotécnicos de cohesión y fricción utilizados en los diseños de Consorcio Gerencia Mazar para el estrato de roca fresca.

En el Capítulo I luego de realizar la recopilación de la información existente, se procede con la presentación de la investigación y situación inicial con la que se proyectó la estabilidad del talud sobre el vertedero.



En el Capítulo II se hace una recopilación sobre la información de geología, geomorfología, tectónica, sismicidad, litología, estratigrafía en la zona específica donde se emplaza el talud.

En el Capítulo III se analizan los datos provenientes del monitoreo del talud, que es realizado desde el año 2007 por personal de la central Mazar. Estas lecturas permiten identificar los movimientos característicos del macizo rocoso con vectores de movimiento y velocidad, nivel piezométrico, posibles lugares de falla y estratigrafía del talud a analizar.

Con los datos identificados en los capítulos II y III, en el Capítulo IV se analizan los datos geotécnicos e hidrológicos, que influyen en la modelización del macizo, definiendo los datos que serán sujetos a variar en el análisis y el rango de variación que tendrán. Además, se determina el perfil representativo del talud y los factores que influyen en la estabilidad del mismo. Se determina un rango de datos sobre los que se realizará el análisis probabilístico.

En el Capítulo V, Análisis de la Estabilidad del Talud, se hace una síntesis teórica sobre el análisis probabilístico en taludes y se determina el método más adecuado y pertinente para analizar la estabilidad del talud. Aplicando el método probabilístico adecuado, se realiza el análisis de estabilidad y se obtiene el factor de seguridad del talud en 245 escenarios diferentes, en función de las variaciones efectuadas a los parámetros geotécnicos considerados en los diseños de Consorcio Gerencia Mazar [3].

En el Capítulo VI se presentan las conclusiones del estudio realizado y se dan las recomendaciones pertinentes.



CAPÍTULO II: GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

2.1 Introducción

El Proyecto Hidroeléctrico Paute-Mazar, desde su etapa de selección de alternativas, fue objeto de varios levantamientos geológicos básicos e investigaciones de subsuelo, realizados con la finalidad de obtener elementos e información que permitieron una comparación real y una selección justificada del sitio, tipo de presa, obras anexas y condiciones del embalse.

En esta investigación se presentan los principales datos geológicos y geotécnicos que influyen directamente en el análisis de estabilidad del talud sobre el vertedero de la Presa Mazar.

2.2 Geología

Los datos geológicos de la zona de estudio se obtuvieron de Sweco & Botconsult [1], Diseño Ejecutivo Consorcio Gerencia Mazar [3] y, Estudios Geofísicos métodos: Sísmica de refracción y resistividad eléctrica [8]. En el anexo No. 02, se presenta un Mapa Geológico de la Zona de emplazamiento de la Central Mazar y a continuación se resume la información geológica recopilada.

Analizado el mapa geológico de la zona de estudio de esta tesis y acorde a los diferentes análisis geológicos ya referenciados, se concluye que el talud situado junto al vertedero a la derecha la presa, se encuentra en la Unidad Geológica Ingapata.

En las laderas del valle del río Paute, el basamento metamórfico del Mesozoico está representado por las unidades estratigráficas de la serie Paute y/o subdivisiones Alao-Paute y El Pan.

En la zona del embalse y áreas perimetrales al proyecto, existe una cobertura de material volcánico de edad Terciaria (formación Tarqui) así como depósitos Cuaternarios y recientes (terrazza morfológica Guarainac, formación Gualaceo, suelos residuales, terrazas aluviales antiguas, aluviales recientes, coluviales y depósitos glaciares). Justo en la zona de la Presa Mazar, se ubica geológicamente la subdivisión Jurásica (media-superior) Alao-Paute, que está conformada por rocas de naturaleza metavolcánica y metasedimentaria, que contienen esquistos (cuarcíticos, cloríticos, pelíticos, grafíticos), mármoles, horizontes de rocas verdes andesíticas y metatobas.



La subdivisión Alao-Paute está compuesta por las siguientes unidades (La Letra, Ingapata y Ermita), cuyas características litológicas se resumen a continuación:

Unidad La Letra

Infrayace a la unidad Ingapata, su contacto se observa a partir de la confluencia de los ríos Paute y Mazar en su margen izquierda. Está constituida por esquistos verdes de fina foliación, esquistos gráfíticos, cuarcitas de colores gris claro a oscuras y filitas.

Unidad Ingapata

La Unidad Ingapata está representada por rocas foliadas con esquistos cuarcíticos micáceos y cloríticos, con importantes intercalaciones de rocas masivas tales como cuarcitas (metavolcanitas), esquistos cuarcíticos y diques volcánicos.

La faja suprayacente a la unidad La Letra se la ha subdividido en tres miembros:

Miembro superior, de 80 m de espesor, en él predominan cuarcitas de color gris oscuro intercaladas con capas de esquistos cloríticos, filitas, esporádicos niveles calcáreos y patinas de carbonatos de calcio entre los planos de diaclasamiento.

El miembro intermedio de 300 m de potencia aproximada, está conformado por franjas alternantes de esquistos cloríticos masivos y finamente laminados, esquistos cloríticos silicificados y cuarcitas masivas que incluyen vetas de cuarzo.

El miembro inferior de 150 m de espesor aproximado, está representado por esquistos cuarcíticos (muscovíticos, zoisíticos, plagioclasa, biotita y epidota), de color gris oscuro, distribuidos en estratos y/o paquetes masivos con capas delgadas de fina foliación, alternados con paquetes de rocas metavolcánicas de color gris y gris verdoso.

Unidad La Ermita

Está constituida por una intercalación de capas y paquetes de cuarcitas, esquistos cloríticos, metatobas y meta andesitas. El conjunto se presenta en unos tramos en estratos gruesos de 1,2 m y masivos, en otros con evidente predominio de capas delgadas, foliación fina y una fuerte deformación tectónica (plegamiento, fuerte fracturamiento y fallamiento).



2.3 Geomorfología

A escala regional, la central Mazar se encuentra en la sierra ecuatoriana que forma parte de los Andes y está constituida por dos cadenas montañosas: La cordillera Occidental y la Central o Real, así como una región deprimida denominada el Valle o Callejón Interandino, dividido por umbrales montañosos transversales. El callejón interandino así constituido, dio lugar a la formación de los valles o cuencas intramontañas [6], y la central Mazar a escala local se ubica en el valle del río Paute.

A continuación se describen varios procesos morfogenéticos que definen las formas del valle del río Paute, tomado de [1]:

Se identifican dos sectores en el valle del río Paute, una zona del valle que es la más antigua de gran amplitud a donde llegan las inundaciones a causa de la represa con cota sobre los 2200 msnm y la parte joven en donde está emplazada la central mazar definida por ser más estrecha y con vertientes abruptas, siendo esto la evidencia de la actividad orogénica.

En la zona joven la erosión fluvial, por debajo de la cota 2200 msnm es predominante en relación a los procesos acumulativos en la zona antigua del valle del río Paute.

La meteorización química (alteración de los materiales), es más representativa en las vertientes medias del valle antiguo.

Regionalmente, la erosión gravitacional que actuó intensamente en la denudación del valle antiguo (sobre los 2 200 msnm), continua definiendo las formas del relieve actual.

Los procesos de acumulación de material de transporte fluvial se dan principalmente en las zonas de inundación del río Paute. Fenómenos similares se observan en la confluencia de drenajes secundarios e históricamente en varios niveles de terrazas relictas.

Varios factores han intervenido en el desarrollo morfológico:

Las características litológicas, estructurales y el comportamiento geomecánico de las formaciones rocosas de base han sido los condicionantes intrínsecos



principales en la definición de la forma del relieve, en la orientación (principalmente N-NE) del valle del río Paute y en el desarrollo de los procesos erosivos gravitacionales. Se citan como ejemplos de estas características, que:

Rocas de las subdivisiones Alao-Paute y El Pan presentan una asimetría pronunciada de los dos flancos del valle. En la unidad La Letra, los movimientos superficiales predominantes se localizan en el flanco izquierdo, favorecidos por la inclinación de los planos de foliación y en el derecho asociados a la descompresión.

Los principales sistemas de estructuras controlan el sistema de drenaje principal y secundario. La tendencia general del valle guarda una orientación en correspondencia con el sistema N-NE y los cambios de curso en la zona de Mazar se relacionan a varios sistemas de fallamiento y foliación bien definidos en el campo.

Factores externos como la pluviosidad (que conlleva la saturación del material), eventuales sismos y la actividad humana también han incidido en la formación del relieve actual.

El plegamiento principal que afectó a las rocas de la zona corresponde al sinclinatorio del río Paute. Los plegamientos secundarios observados en las unidades Ermita e Ingapata, corresponden a la flexión en forma de S (monoclinal) por efectos del desplazamiento a lo largo de un eje sin que en superficie aparezcan grietas de fractura o falla.

2.4 Tectónica

El Diseño Ejecutivo de Consorcio Gerencia Mazar (2006) [3], recopila información tectónica de varios autores, indicando que según el autor Pegnington (1981) la geodinámica del Ecuador está influenciada por el cambio en la inclinación de la zona de subducción entre la Placa de Nazca con la Placa de América del Sur o Sudamericana.

En el Gráfico No. 2.1 se presenta una adaptación de la ubicación de la zona de la central Mazar con respecto a las placas tectónicas y la cordillera de los andes [18].

MARCO GEODINAMICO ACTUAL DE LA REGION



Gráfico 2.1: Mapa Geodinámica de la región Sudamericana. García, E. (2007) [18].

La placa de Nazca mide aproximadamente $10 \times 10^6 \text{ km}^2$, se considera como una placa mediana, es exclusivamente oceánica y está constituida por materiales densos. Esta placa se subduce bajo la placa Sudamericana como se indica en el Gráfico No. 2.2, esta última comprende América del Sur y la mitad occidental del Atlántico Sur hasta su dorsal media. La parte de la corteza oceánica que se subduce se denomina Zona de Benioff siendo la causante de grandes terremotos y de volcanismo en la región Andina [19].

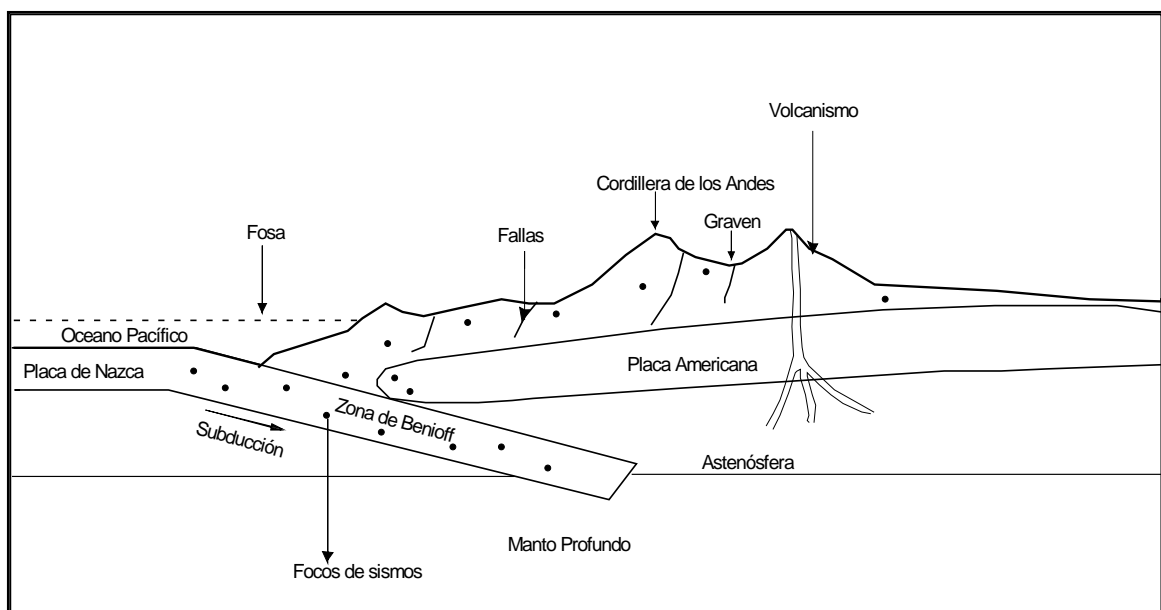


Gráfico 2.2: Proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Proyecto Precupa (1998) [19]

La Central Mazar se ubica entre dos ambientes de deformación: Andes Centrales y Bloque Norandino, sin embargo no se presentan evidencias claras de fallamiento activo en su cercanía, a más de los sitios de concentración de sismicidad de baja magnitud asociada a la falla Peñas Coloradas y a una estructura aún no definida al sureste del sitio Mazar [3].

La Falla Peñas Coloradas se define sobre la base de evidencias microsísmicas. No se han encontrado evidencias morfológicas ni microestructurales concluyentes que apoyen la hipótesis de que esta falla es de edad cuaternaria [3]. Según Diseño Ejecutivo (2006) [3] la falla de Peñas Coloradas se la ubica al norreste del sistema de fallas Sigsig, Paute, Gualaceo, siendo parte de este sistema. En el estudio PRECUA (1998) [19] se la denomina falla de Paute o Gualaceo.

La Falla Pallatanga tiene una longitud de alrededor de 70 kilómetros y un rumbo NNE. El segmento que más próximo se encuentra del sitio de obras de Mazar está a 70 kilómetros al Noreste [3].

En los Andes Centrales, en el ámbito de placa superior, la Zona Subandina sería la que absorba gran parte de la deformación producto del movimiento de la placa Nazca contra la placa Sudamericana. Mientras que para el Bloque Norandino, su límite más claro y activo corresponden al sistema de fallas Chingual - Pallatanga - Guayaquil, de velocidad estimada en 4 mm/año. En el Gráfico No. 2.3 constan las principales fallas geológicas en el sur del Ecuador identificada en el Proyecto Precupa (1998) [19].

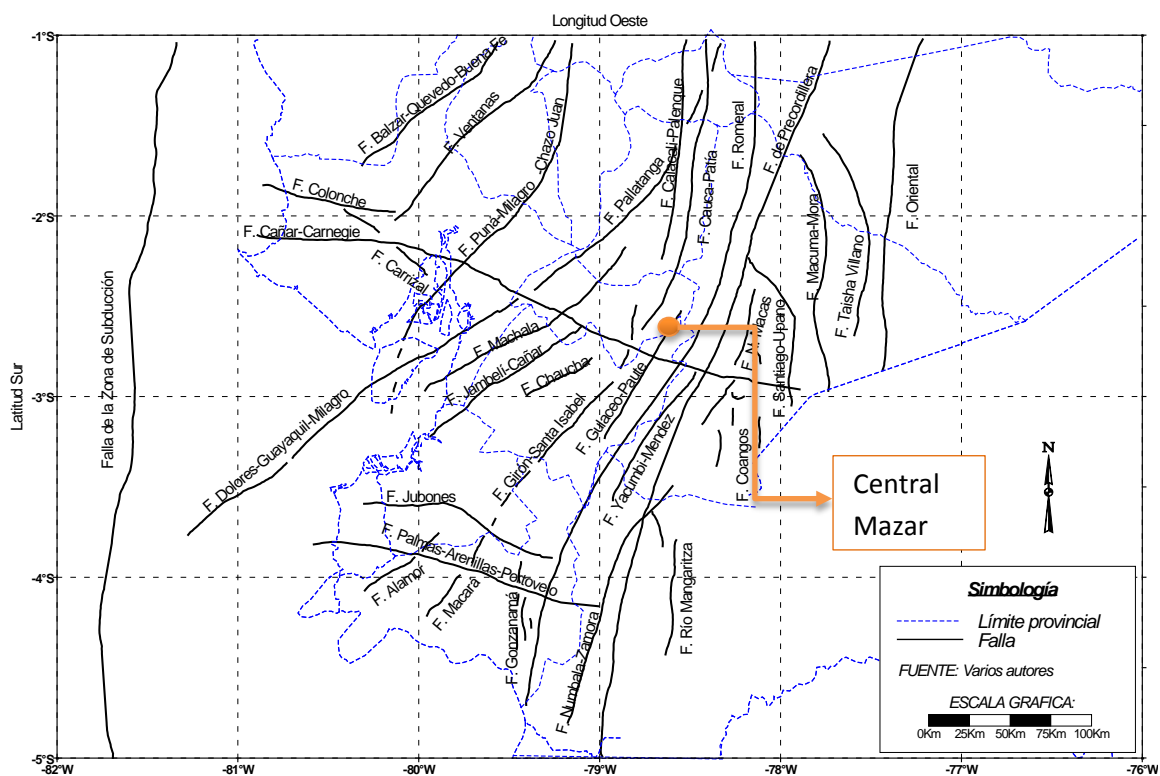


Gráfico 2.3: Principales falla geológicas del sur del Ecuador. Proyecto Precupa (1998) [19]

Se han reconocido tres fases de deformación tectónica, que en la zona del proyecto se deben a esfuerzos compresivos, y en las áreas vecinas a esfuerzos distensivos.

Del informe [5], se tiene que según Bristow (1865)¹, las rocas de la serie Paute y/o subdivisión Alao-Paute sufrieron el diastrofismo principal durante la fase laramídica, generando una compresión intensa en dirección general Oeste-Este. Los pliegues que ocurrieron en esta fase, son muy comprimidos, isoclinales, acompañados por una foliación extremadamente desarrollada y boudinage en los horizontes de roca competente, los pliegues mayores fueron sustituidos por fallas de empuje, resultando estructuras de escamas tectónicas.

Con posterioridad a la fase principal se produjeron por lo menos dos plegamientos adicionales que provocaron la rotación de las estructuras antiguas, ocurriendo en los horizontes filíticos, un plegamiento secundario, que a su vez generó una segunda foliación, de la misma intensidad que la foliación principal.

La principal estructura tectónica es el sinclinorio del río Paute, cuyo eje se alinea en sentido N-NE. También se ha identificado, tanto en la zona del embalse como en el área de la central, algunos sistemas de fallamiento regional tales como:

¹ Bristow=Henry William Bristow (17 de mayo de 1817 - 14 de junio de 1889) fue un geólogo, y naturalista inglés



desplazamientos transcurrentes de pocos metros, escamas tectónicas y varios sistemas de discontinuidades.

2.5 Sismicidad y volcanismo

De acuerdo a la recopilación y revisión de estudios realizada por Sweco & Bolt [1], la zona de estudio se encuentra entre a dos ambientes geodinámicos que definen el riesgo sísmico. Estos dos ambientes se los denomina “Bloque Norandino” y el de “los Andes Centrales”. Se definen estos ambientes en base a la evaluación tectónica del Noroeste de Sudamerica a partir de los mecanismos focales de 56 terremotos de magnitud $\geq 4,2$ y concluye que entre los 2° y 4° Sur, el plano de Benioff² buza 35° en dirección N35°E.

La sismicidad histórica de la región cercana al proyecto muestra que la cuenca media del río Paute ha experimentado intensidades del orden de 7 grados en la escala MKS³, producida fundamentalmente por sismos de magnitud $M_s^4 > 7$, localizados en la placa Nazca a profundidades de alrededor de 100 km bajo la zona del proyecto [3].

Según los Estudios de Sweco & Botconsult [3], revisados varios estudios y reporte citados en el capítulo 5 de ese estudio, ni la Subducción Norte, ni las fallas de rumbo del límite oriental del Bloque Norandino han generado intensidades mayores que 6 en el sitio del proyecto [1].

La sismicidad instrumental de la Red Nacional de Sismógrafos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, destaca como el evento más importante en el sector, en 10 años de registros, al terremoto de Macas de 1995, ubicado a 80 km al Este del emplazamiento de obras, con $M_s = 6,9$ y con su nube de réplicas. Fue localizado en la zona Subandina, pero con perturbación general en la región, tanto que algunas de sus réplicas en el rango de magnitud de 3 a 5, se ubicaron en las inmediaciones del proyecto [3].

En el Gráfico No. 2.4 se observa los valores sugeridos por la Red sísmica del Austro del Ecuador para el riesgo sísmico para la zona de estudio. Se adaptó el gráfico para indicar la ubicación de central mazar, que está en la línea de riesgo sísmico de 0,24g.

² Plano de Benioff = es una zona sísmica de borde de placa que se extiende junto a uno de los lados de una fosa oceánica

³ MKS= Escala Medvedev-Sponheuer-Karnik, escala de intensidad macrosísmica, tiene 12 grados.

⁴ M_s = Magnitud de ondas superficiales, esta escala se basa en la amplitud máxima producida por las ondas superficiales con período en el rango de 18 a 22 segundos

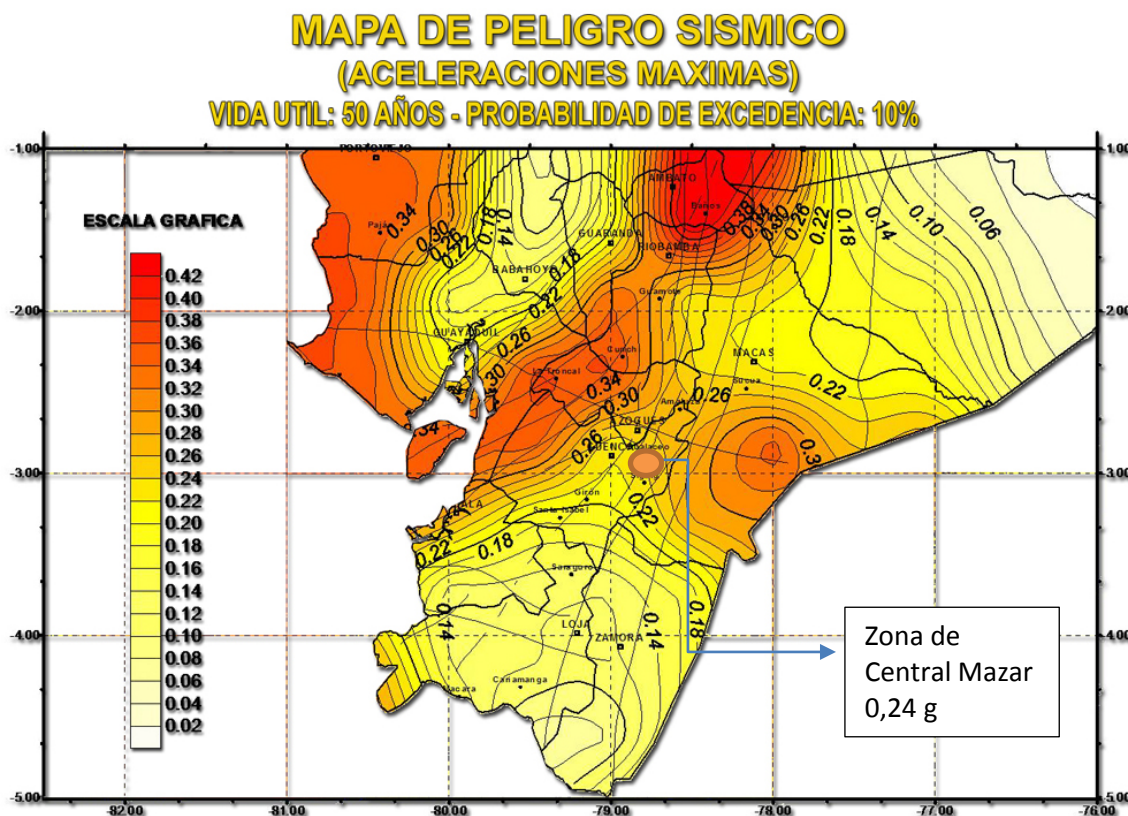


Grafico No. 2.4: Mapa de Peligro sísmico
Fuente: Red Sísmica del austro

El Diseño Ejecutivo de Consorcio Gerencia Mazar [3], luego de un análisis para un período de retorno de 1000 años, recomienda la utilización de 0,24 g como parámetro de aceleración máxima esperada en el sitio de construcción de la presa. Para esta tesis se toma éste valor.

2.6 Litología y estratigrafía

Los trabajos de campo realizados en los diferentes estudios con los que contó INECCEL actualmente HIDROPAUTE, señalan que el vertedero se encuentra sobre la Unidad Ingapata, en la que se han identificado los siguientes miembros [3]:

El miembro superior, de 80 m de espesor, está constituido por una intercalación de capas de esquistos cloríticos, filitas, alto porcentaje de cuarcitas grises y esporádicos niveles calcáreos en las fracturas y foliación.

El miembro medio, de 300 m de espesor aproximado, está constituido por una secuencia alterna de esquistos cloríticos masivos y finamente laminados, esquistos cloríticos silicificados, así como cuarcitas masivas con cuarzo.



El miembro inferior, de 150 m de espesor, con esquistos cuarzo - muscovíticos, zoisiticos, de color gris oscuro en estratos masivos a finamente laminados que se alternan con paquetes de metavolcanitas.

La unidad descrita, sobre la cota 2200msnm, está cubierta parcialmente por depósitos no consolidados de poco espesor, que no son considerados en este estudio prácticamente no influyen en la estabilidad del macizo que conforma el talud.

2.6.1 Resultados sísmica de refracción y resistividad eléctrica

Con el propósito de determinar la geometría y geología de la ladera derecha sobre la ubicación del vertedero, INECEL, según [8], ejecutó seis perfiles sísmicos denominados SR-9-V, SR-10-V, SR-11-V, SR-12-V, SR-13-V, SR 14-TD, y cuatro sondeos Eléctricos verticales: SEV-4-V, SEV-5-V, SEV-6-TD y SEV-7-TD. La ubicación de los ejes de los sondeos eléctricos y perfiles sísmicos se puede apreciar en el anexo No. 05 Ubicación Sondeos Eléctricos y perfiles sísmicos.

En el cuadro No. 2.1 se presenta la ubicación por coordenadas UTM⁵ de los perfiles realizados:

Nombre	Long. (m)	Coord. iniciales Este	Coord. finales Este	Coord. iniciales Norte	Coord. finales Norte	Sector
SR-9-V	550	764.709,720	764.872,500	9'712.870,000	9'713.679,910	Vertedero
SR-10-V	110	764.760,350	764.744,250	9'713.051,300	9'712942,470	Vertedero
SR-11-V	220	764.762,740	764.951,180	9'713.076,760	9'713.190,280	Vertedero
SR-12-V	330	764.675,350	764.869,380	9'713.137,300	9'713.404,240	Vertedero
SR-13-V	330	764.638,370	764.832,250	9'713.148,300	9'713.412,640	Vertedero
SR-14-TD	220	764.663,930	764.876,500	9'713.358,420	9'713.407,590	Terraza derecha

Cuadro No. 2.1 se presentan la identificación por coordenadas UTM de los perfiles analizados, Adaptado de INELCEL [8].

En los seis gráficos presentados a continuación, del 2.5 al 2.10, se puede observar los perfiles sísmicos representativos obtenidos en el estudio Geofísico métodos: Sísmica de Refracción y Resistividad Eléctrica [8].

⁵ UTM= sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (en inglés Universal Transverse Mercator, UTM) es un sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator

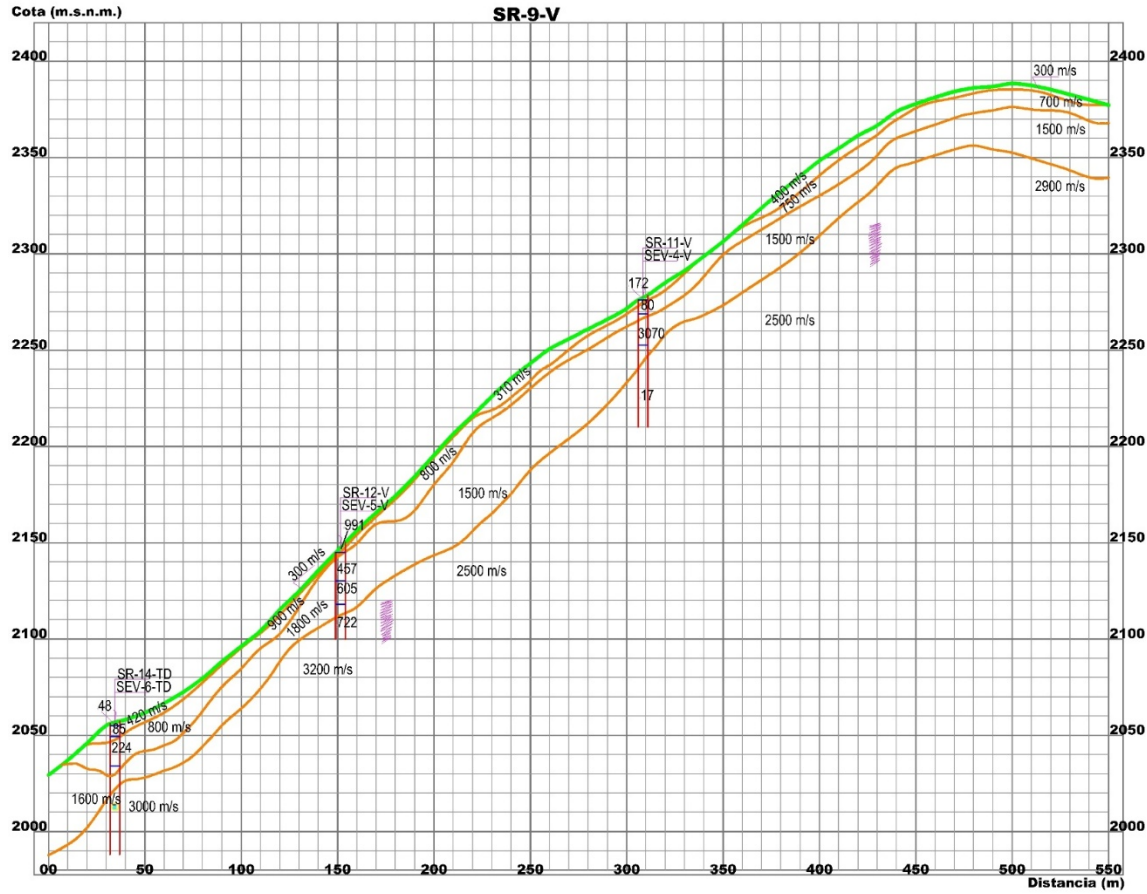


Gráfico No. 2.5: Perfil SISMICO SR-9-V
Fuente: Estudio Geofísico métodos: Sísmica de Refracción y Resistividad Eléctrica [8]

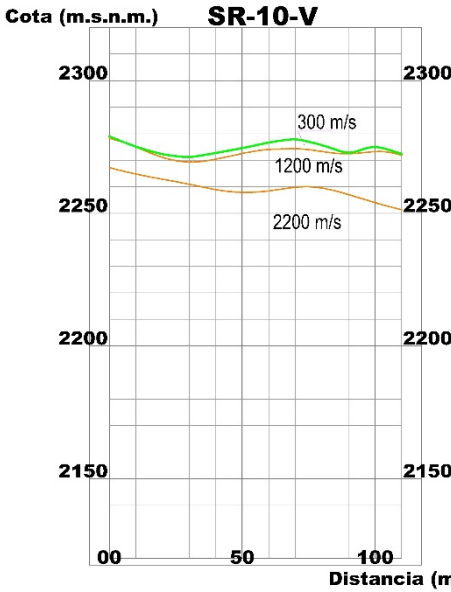


Gráfico No. 2.6: Perfil SISMICO SR-10-V
Fuente: Estudio Geofísico métodos: Sísmica de Refracción y Resistividad Eléctrica [8]

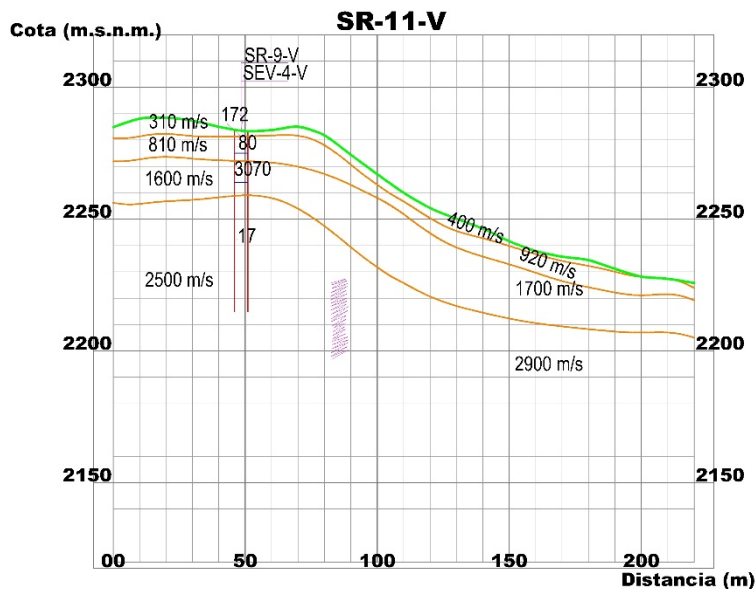


Gráfico No. 2.7: Perfil SISMICO SR-11-V

Fuente: Estudio Geofísico métodos: Sísmica de Refracción y Resistividad Eléctrica [8]

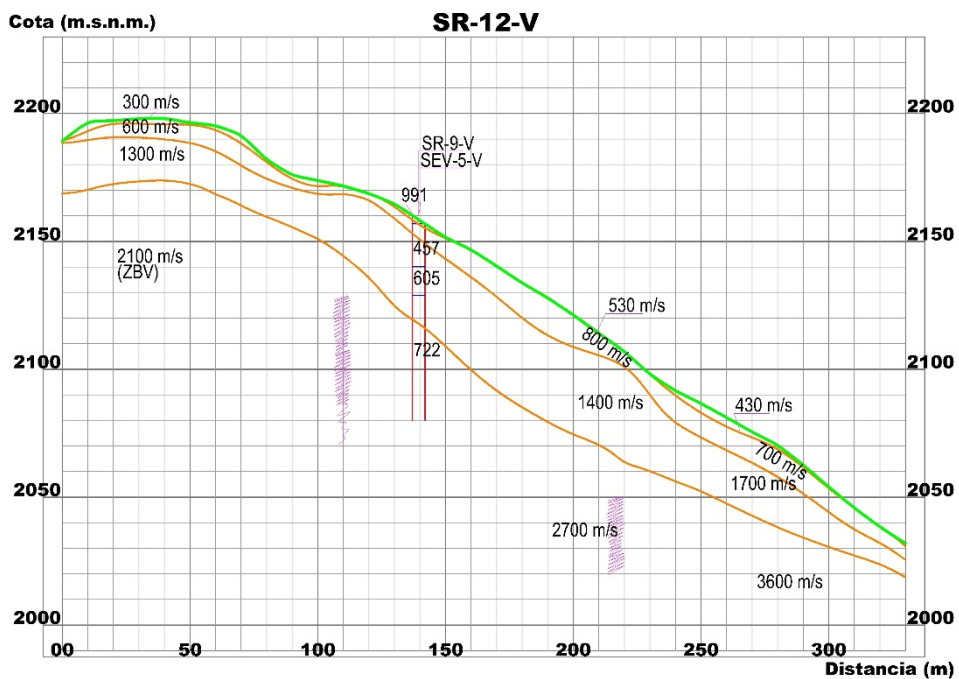


Gráfico No. 2.8: Perfil SISMICO SR-12-V

Fuente: Estudio Geofísico métodos: Sísmica de Refracción y Resistividad Eléctrica [8]

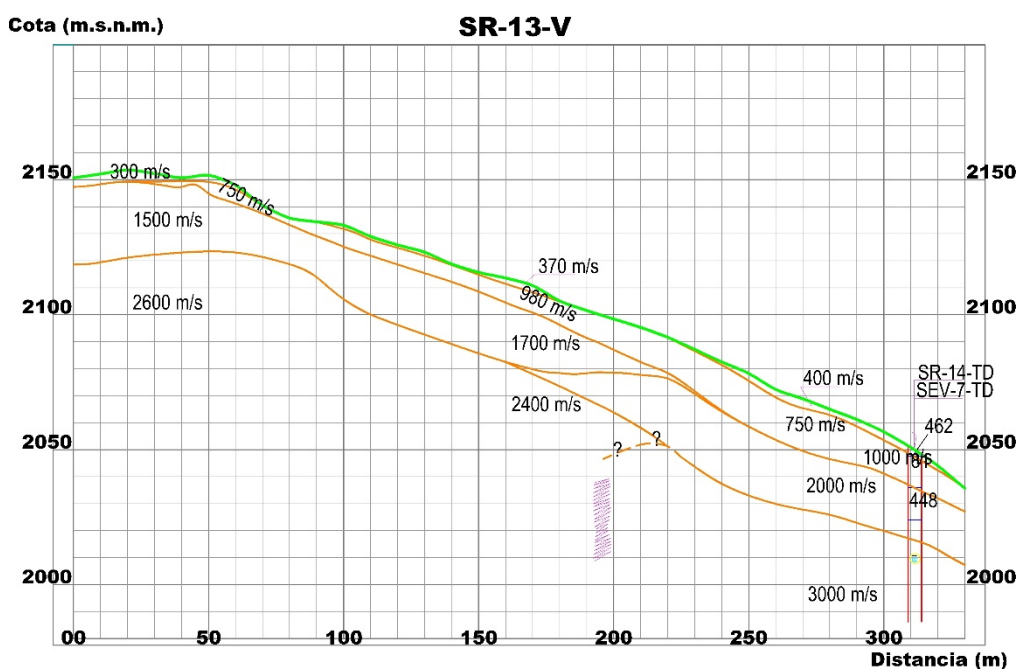


Gráfico No. 2.9: Perfil SISMICO SR-13-V
Fuente: Estudio Geofísico métodos: Sísmica de Refracción y Resistividad Eléctrica [8]

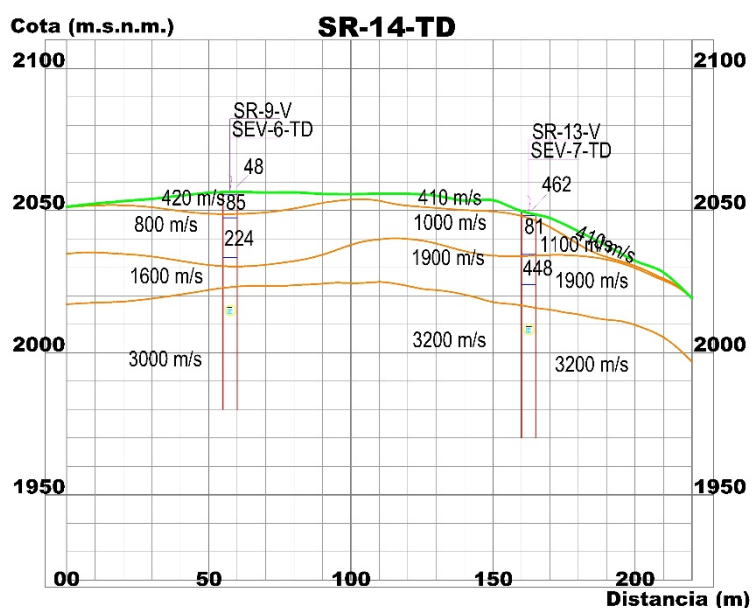


Gráfico No. 2.10: Perfil SISMICO SR-14-TD
Fuente: Estudio Geofísico métodos: Sísmica de Refracción y Resistividad Eléctrica [8]

En el estudio de INECCEL (2005) [8] se realiza una correlación entre los datos geológicos, la capacidad de velocidad de transmisión sísmica y resistividad eléctrica, identificando cuatro capas:



Capa superficial

Velocidad sísmica: 300 a 530 m/s
Resistividad Eléctrica: 72 a 1.286 Ohm-m

Se trata de suelos entremezclados con coluviales finos.

En cuanto a la geometría de esta capa se puede decir que es muy irregular y que no aparece a lo largo de toda la zona investigada, así se tiene que:

En SR-9-V aparece a partir de 0+020 con 10 metros de espesor que van disminuyendo rápidamente hasta que en 0+090 llega a 1 metro, espesor que se mantiene hasta 0+220 en que se produce un aumento a 6 metros. Esta potencia tiene una disminución gradual hasta 0+340 en que desaparece y en 0+360 se presenta nuevamente con 7 m que poco a poco van reduciéndose hasta que al final del perfil es de 1 a 2 m.

En SR-10-V esta capa tiene un espesor que varía entre 0 y 3 m, siendo su menor presencia al inicio del perfil.

Al inicio de SR-11-V alcanza su mayor potencia que va disminuyendo gradualmente conforme avanza el perfil y en 0+200 desaparece.

En SR-12-V se presenta muy irregularmente, entre 0+000 y 0+150 varía entre 1 y 3 m, desaparece entre 0+150 y 0+205 donde nuevamente hace presencia hasta 0+310 con 4 m como máximo en 0+260.

En SR-13-V se la ha interpretado con un espesor variable entre 1 y 3 m, desde 0+000 a 0+070 en que desaparece, se presenta nuevamente desde 0+090 hasta 0+180 con un espesor que varía entre menos de 1 y 2 m, finalmente aparece desde 0+225 hasta 0+325 con un máximo de 3 m y luego desaparece.

En SR-14-TD tiene un comportamiento irregular, en 0+000 es mínimo y aumenta paulatinamente hasta 0+060 en que llega a 9 m, luego tiende a disminuir gradualmente y en 0+100 alcanza 2 m, hacia adelante mantiene un espesor promedio de 4 m y desaparece en 0+215.

Existe una buena correspondencia entre los valores sísmicos y geoelectricos interpretados para esta capa.

Los valores geoelectricos son altos y no identifican concentraciones de agua subterránea a este nivel.



Capa segunda

Velocidad sísmica: 600 a 1.200 m/s
Resistividad Eléctrica: 80 a 457 Ohm-m

Podría tratarse de coluviales medianos o roca muy alterada.

Al inicio de SR-9-V podría tratarse de materiales aluviales, que no ha sido factible diferenciarlos de los coluviales ya que presentan un comportamiento sísmico similar, en 0+035 tiene un espesor de 18 m que disminuyen conforme sube el perfil y en 0+140 es de 1 metro que se mantiene hasta 0+220, luego se incrementa paulatinamente y llega a 10 m en 0+250, luego disminuye y en 0+335 desaparece, a partir de 0+360 se la ha interpretado nuevamente y alcanza 7 m, y con pequeñas variaciones llega al final del perfil.

En SR-10-V se presenta de una forma bastante regular, al inicio con un espesor de 12 m y aumentando gradualmente hasta llegar al final con 20 m.

En SR-11-V se presenta sin mayores variaciones, al inicio con una potencia de 10 m que paulatinamente disminuye hasta arribar a 0+220 con 5 m.

Al inicio de SR-12-V tiene 1 metro de potencia que se incrementa rápidamente hasta 5 m, entre 0+160 y 0+205 aflora en la superficie y en 0+190 llega a 15 m que es el mayor espesor de esta capa, hacia abajo el espesor varía entre 5 y 10 m.

Entre 0+000 y 0+020 de SR-13-V no aparece, hacia adelante tiene un incremento paulatino que llega hasta 15 m y al final del perfil disminuye a 8 m.

En SR-14-TD desde 0+000 hasta 0+170 tiene un comportamiento bastante regular con un espesor que varía entre 12 y 18 m, más adelante disminuye hasta 1 metro con lo que llega al final del perfil.

Existe una buena correspondencia entre los valores sísmicos y geoeléctricos que se han determinado para esta capa, pero los valores de resistividad eléctrica son muy altos, por lo tanto se descarta la existencia de agua subterránea.

Capa tercera

Velocidad Sísmica: 1.300 a 2.200 m/s



Resistividad Eléctrica: 450 a Tiende a Infinito Ohm-m

Se trata posiblemente de rocas medianamente alteradas.

Al inicio de SR-9-V esta capa tiene un espesor de 44 m, pero no se puede descartar que pueda estar entremezclada con materiales aluviales muy consolidados y conformado por bloques grandes que podría tener un comportamiento sísmico similar al de la roca medianamente alterada que está presente hacia la parte superior, en 0+035 llega a 7 m de potencia y hacia la parte superior y hasta 0+130 tiene un comportamiento uniforme, 20 m de espesor, luego de este punto se incrementa paulatinamente hasta 50 m en 0+230, luego empieza una declinación que llega a 12 m en 0+330, hacia el final del perfil tiene un comportamiento más o menos uniforme que varía entre 15 y 30 m.

En SR-10-V es el último estrato identificado por lo que no se conoce su espesor.

En SR-11-V tiene un comportamiento muy uniforme, empieza con 16 m y con ligeras variaciones llega al final del perfil con 15 m.

En SR-12-V tiene un desarrollo uniforme, al inicio tiene un espesor de 20 m, al centro del perfil de 35 m y finaliza con 7 m luego de una disminución gradual.

En SR-13-V presenta un comportamiento uniforme, al comienzo del perfil con un espesor de 28 m, al centro con 22 m y para finalizar con 20 m.

En SR-14-TD el comportamiento de este estrato es bastante regular, con excepción de un estrechamiento en 0+070 que alcanza a 8 m, la potencia de esta capa va de 18 a 22 m.

Geoelectricamente este estrato funciona como una unidad con la capa subyacente.

Los valores de la resistividad eléctrica verdadera interpretados son altos y de ninguna manera identifican la presencia de niveles con agua subterránea en los sitios donde se ejecutaron los sondeos eléctricos verticales.

Capa cuarta

Velocidad Sísmica: 2.500 a 3.600 m/s
Resistividad Eléctrica: 17 a tiende a infinito Ohm-m



Podría tratarse de roca poco alterada a fresca, es el último estrato reconocido por esta investigación por lo que no se ha identificado su límite inferior.

En SR-9-V entre 0+000 y +185 se ha identificado un valor que va de 3.000 a 3.200 m/s, a partir de este punto y hasta 0+430 se ha calculado un valor de 2.500 m/s que representa una disminución en las propiedades físicas de la roca, o lo que se reconoce como una zona de cambio lateral, hacia adelante de 0+430 este material tiene una velocidad de 2.900 m/s.

En SR-11-V alcanza una velocidad de 2.500 m/s entre 0+000 y 0+100, en este punto se ha identificado una zona de cambio lateral y la velocidad pasa a 2.900 m/s con la que llega al final del perfil.

En SR-12-V es el perfil donde se ha identificado el menor valor de velocidad sísmica para este estrato, 2.100 m/s entre 0+000 y 0+110, abscisa en la que se ha determinado la existencia de un cambio lateral de las propiedades físicas de la roca, este tramo se lo reconoce como una zona de baja velocidad, Z. B. V., entre 0+110 y 0+220 se ha detectado una velocidad sísmica de 2700 m/s lo que establece la existencia de otra zona de cambio lateral ya que hacia adelante de 0+220 se ha calculado 3.600 m/s que representa una roca .

En SR-13-V entre 0+000 y 0+200 se ha determinado una velocidad que varía entre 2.400 y 2.600 m/s que representaría a una roca poco alterada, hacia adelante se ha interpretado una velocidad de 3.000 m/s que identifica a una roca fresca, lo que establece la existencia de una zona de cambio lateral en 0+200.

En SR-14-TD la velocidad varía entre 3.000 y 3.200 m/s por lo que no presenta ninguna anomalía de importancia.

Geoelectricamente esta capa funciona como una unidad con la capa superior.

El valor de 17 Ohm-m que se ha interpretado como último valor en el SEV-4-V podría identificar la presencia de agua subterránea, pero se trata de un solo punto, por lo que para confirmar esta posibilidad se debería ampliar el estudio por el método geo eléctrico.

En resumen, en el cuadro No. 2.2 se presenta la correlación entre la Geología y las capas identificadas a través de la sísmica.



Capa	Velocidad sísmica m/s	Resistividad eléctrica ohm-m	Características geológicas	Espesor (m)
Superficial	300 a 530	48 a 991	Suelo, coluvial fino	$0 < E < 10$
Segunda	600 a 1200	80 a 457	Coluvial grueso, roca alterada	$0 < E < 20$
Tercera	1300 a 2200	457 a Tiende a infinito	Roca medianamente alterada	$7 < E < 50$
Cuarta	2500 a 3600	17 a Tiende a infinito	Roca poco alterada a fresca	Desconocido

Cuadro No. 2.2: Resumen de correlación entre Geología y Estudio Sísmico. Adaptado INECEL [8]

Los datos calculados pueden tener variaciones que alcancen hasta un 15%, por tratarse de métodos indirectos que introducen una fuente de energía externa para generar reacciones de los materiales, las mismas que son medidas e interpretadas en términos geológicos-geotécnicos.

2.7 Geología estructural

En los estudios de INECEL [1], para la actual central mazar, consta que en la zona del vertedero existe sistemas de fracturamiento que se presentan en el cuadro No. 2.3:

Estructuras	Dirección de buzamiento/buzamiento
Foliación:	$154^{\circ} / 45^{\circ}$
Falla:	$170^{\circ} / 42^{\circ}$ a $180^{\circ} / 70^{\circ}$ $112^{\circ} / 56^{\circ}$ a $112^{\circ} / 70^{\circ}$
Diaclasas: A	$41^{\circ} / 66^{\circ}$
B	$290^{\circ} / 30^{\circ}$
C	$95^{\circ} / 50^{\circ}$ ($88^{\circ} / 61^{\circ}$) $84^{\circ} / 80^{\circ}$ ($88^{\circ} / 61^{\circ}$)
D	$347^{\circ} / 26^{\circ}$

Cuadro No.2.3: Sistema de fracturamiento en la zona del Talud sobre el vertedero, [1]



2.8 Conclusiones del Capítulo II

De manera resumida las conclusiones a las que se llega son las siguientes:

- El talud sobre el vertedero se encuentra en la Unidad Geológica Ingapata.
- Geomorfológicamente la orientación general del valle está fuertemente condicionada por el sentido N-NE.
- Toda la zona de estudio se encuentra dentro de una zona tectónica activa. Y las principales estructuras geológicas se alinean en sentido N-NE.
- Para el riesgo sísmico se considera la aceleración máxima como 0,24 g. Tomado del Diseño Ejecutivo de Consorcio Gerencia Mazar [3].
- En la correlación entre la Geología y el estudio sísmico se determina claramente la existencia de cuatro capas, en la ladera antes de que se realizaran los trabajos de explotación del talud. Posterior a la excavación gran parte del talud, quedo con las dos capas inferiores.
- En el talud existen 2 familias y/o sistemas de fracturamiento:

$170^{\circ}/42^{\circ}$ a $180^{\circ}/70^{\circ}$
$112^{\circ}/56^{\circ}$ a $112^{\circ}/70^{\circ}$



CAPÍTULO III: MONITOREO DEL TALUD SOBRE EL VERTEDERO DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MAZAR

3.1 Introducción

El monitoreo implica, investigaciones in situ programadas a largo plazo, que permiten precisar la evolución de los movimientos, el comportamiento de la masa inestable así como las condiciones intrínsecas y externas que pueden incidir o acelerar su desarrollo. Todo ello con el fin de proporcionar criterios para formular previsiones, definir obras de estabilización o procesos de mitigación que minimicen en lo posible los efectos negativos del fenómeno.

En las bermas de estabilización del talud, situado sobre el vertedero de la Central Mazar, se han instalado una serie de instrumentos para monitorear sus movimientos verticales y horizontales, así como sus niveles freáticos, a fin de determinar el nivel de estabilidad del vertedero [2].

El total de instrumentación instalada en las bermas de estabilización del talud situado sobre el vertedero en la margen derecha de la presa es de 59 aparatos, emplazados en diferentes niveles y a diferentes profundidades, como se resume en el cuadro No. 3.1, se han instalado extensómetros, piezómetros, inclinómetros, medidores de filtraciones y puntos para controles topográficos. El levantamiento histórico de los datos registrados por estos aparatos sirve para la presente investigación:

Instrumento	Cantidad	Nomenclatura
Extensómetro	10	E-01 a E-10
Piezómetro cuerda vibrante	8	PE-01 a PE-08
Inclinómetro	10	IN-01 a IN-10
Controles topográficos	31	MS-01 a MS-30, Hito
TOTAL	59	

Cuadro No. 3.1 Instrumentación Monitoreada en Bermas sobre vertedero [2]

En el anexo No. 03, se presenta el esquema de ubicación del monitoreo sobre el talud junto al vertedero de la Central Mazar.



3.2 Extensómetros

Como se indicó en el cuadro 3.1, existen 10 extensómetros en el talud sobre el vertedero de la Presa Mazar. Nueve de ellos poseen cuatro varillas o sensores instalados a distintas profundidades de 10, 20, 30 y 40 m de profundidad, y sólo un extensómetro denominado No. 7, tiene 3 varillas a 10, 20 y 30m.

Se cuenta con datos de monitoreo desde agosto del 2007 con el primer extensómetro, mientras que en el más recientemente instalado el monitoreo comienza en enero del 2010. Analizando el cuadro resumen No. 3.2, se puede notar que los desplazamientos más significativos se dan desde la mitad del talud hacia abajo en los extensómetros E-06, E-05, E-09, E-10.

En el cuadro No. 3.2, se muestra en resumen los desplazamientos acumulados desde el inicio del monitoreo hasta el 22 de septiembre del 2013, que fue el último dato de monitoreo que se facilitó por parte de Hidropaute para esta investigación.

Cota (msnm)	Instrumento	Inicio de Monitoreo	Desplazamiento (mm) Lect. Sept. 2013 (-) Descompresión			
			Profundidad del Sensor (m)			
			40	30	20	10
2330.94	E-01	22-ago-07	-2.50	-2.70	-1.20	-1.61
2271.15	E-02	19-dic-07	-7.00	-4.58	-1.48	-0.50
2270.9	E-04	24-ene-08	-6.00	-5.60	-3.30	-3.10
2256.18	E-08	15-ene-10	-4.20	-4.80	-4.10	-1.40
2196.31	E-03	3-sep-08	-6.40	-6.00	-0.40	0.20
2196.11	E-06	18-nov-08	-13.30	-6.50	-2.00	0.80
2196.08	E-05	20-oct-08	-12.50	-5.40	-5.10	-2.90
2181.1	E-09	23-ene-09	-9.60	-3.40	-2.50	-1.20
2151.15	E-10	22-feb-09	-21.40	-23.30	-19.80	-10.80
2105.89	E-07	15-may-09		0.00	-0.20	-0.20

Cuadro No. 3.2: Adaptado de [2], Datos de desplazamientos Central Mazar a Sept 2013.

3.3 Piezómetro cuerda vibrante

Se han instalado ocho piezómetros eléctricos en las bermas de estabilización a diferentes niveles. De éstos piezómetros algunos de sus sensores se encuentran a profundidades de 100, 80 y 60 m indistintamente [2].

De los datos históricos del monitoreo se evidencia que existe la estrecha relación entre las lecturas del piezómetro PE-02 con la oscilación del nivel del embalse. La cabeza del mencionado piezómetro se encuentra en la berma 2210

msnm, y su sensor a 80 m de profundidad, es decir en la cota 2130, y es el que más cerca se encuentra, por lo que se justifica su relación. En el Grafico No. 3.1 (se presenta más claro en el anexo No. 04) donde se representa el registro histórico de piezómetros y el nivel del embalse, se aprecia claramente esta relación.

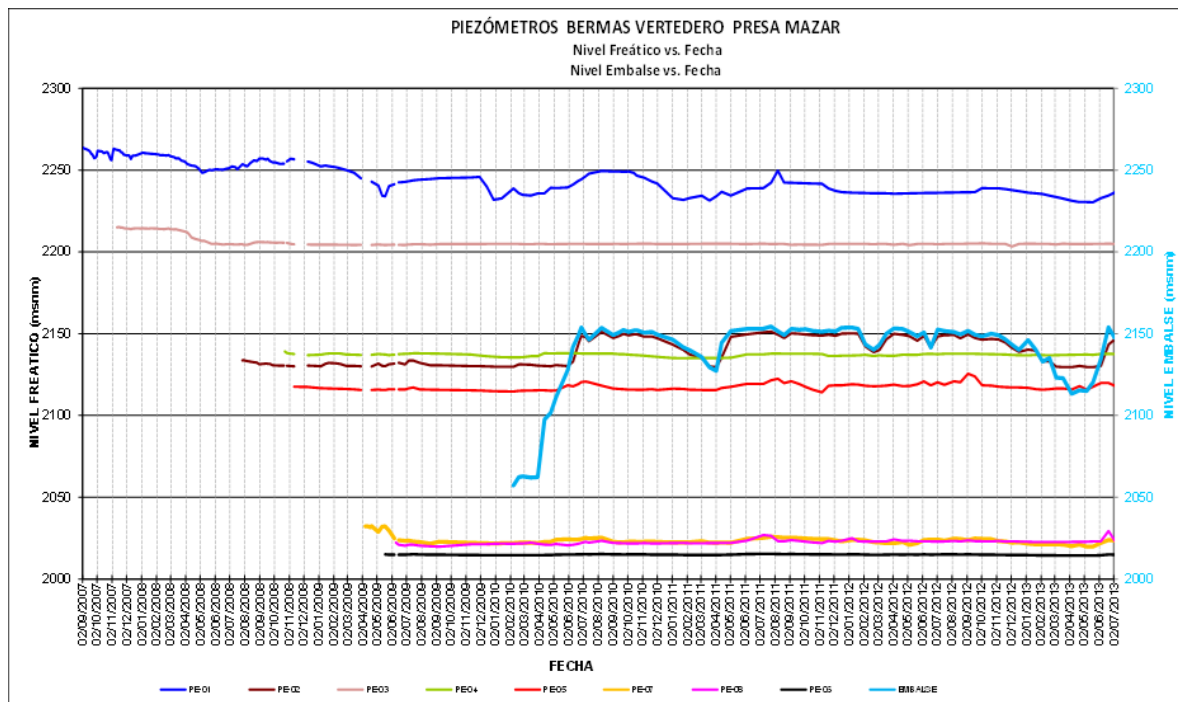


Grafico No. 3.1: Relación directa que existe entre nivel freático del monitoreo y nivel del embalse, especialmente con el monitoreo del piezómetro PE-02.

Los Piezómetros PE-03 y PE-04, están ubicados en alineación con el perfil elegido para esta investigación, y permiten confirmar el nivel piezométrico en el perfil analizado en época lluviosa. En el cuadro No. 3.3 se presenta la ubicación de los piezómetros y el nivel determinado en base al promedio de época lluviosa en los años 2007 al 2013, para los que se disponen datos de monitoreo, para los meses de época lluviosa de cada año.

Piezómetros Eléctricos					Nivel Freático (Lluvia)	Profundidad del nivel (m)
Instrumento	Coordenadas		Elevación	Longitud		
	E	N	(m)	(m)	(m)	
PE - 03	764827.65	9713085.11	2285.54	80	2215	70.54
PE - 04	764793.08	9713157.23	2195.74	80	2138	57.74

Cuadro No. 3.3: Nivel Piezométrico promedio en base a monitoreo 2007-2013 para el perfil elegido



3.4 Inclínómetros

Los once inclinómetros están ubicados en distintas bermas, con diferentes profundidades que oscilan en el orden de 40 a 100 m. y permiten controlar los movimientos del macizo así como obtener la magnitud y dirección de los movimientos.

En la información brindada por INECCEL [1] e HIDROPAUTE [2] se han determinado las magnitudes y direcciones de los desplazamientos ocurridos entre octubre de 2012 y octubre de 2013, los cuales se detallan en el cuadro No. 3.4.

Inclinómetro	Desplazamiento Oct. /2012 (mm)	Desplazamiento Oct. /2013 (mm)	Incremento Desplazamiento (mm)	Sentido
IN-1	5	7,5	2,5	NW
IN-2	4	3	-1	N
IN-3	42	76	34	W
IN-4	27	32	5	W
IN-5	32	33	1	W
IN-6	24	26	2	W
IN-7	2	6	4	NW
IN-8	5	8	3	NW
IN-9	5	7,5	2,5	NW
IN-10	2,5	2	-0,5	NW

Cuadro No. 3.4: Información de Inclínómetros, en el Período oct. 2012 a oct. 2013, Datos monitoreo Central Mazar [2]

En el cuadro No. 3.4, se observa que el mayor movimiento ocurre en el inclinómetro IN-3, con un desplazamiento de 34 mm hacia el oeste. Este inclinómetro está ubicado en la cota 2270 msnm. En general el sentido del movimiento en el sub-suelo tiende hacia el oeste y noroeste, lo que se correlacionará con los datos en la superficie del talud que son también monitoreados topográficamente

Observando el registro histórico de los inclinómetros, al inicio del monitoreo en el 2008 se detectó una zona de cizalla en cuatro inclinómetros

- IN-03 entre 65 y 70 m de profundidad, aproximadamente en cota 2205 m, desplazamiento \approx 20 mm
- IN-04 entre 50 y 55 m de profundidad, aproximadamente en cota 2180 m, desplazamiento \approx 20 mm



- IN-05 entre 30 y 25 m de profundidad, aproximadamente en cota 2155 m, desplazamiento ≈ 20 mm
- IN-06 a los 20 m de profundidad, aproximadamente en cota 2160 m, desplazamiento ≈ 15 mm

Esto determinaría la existencia de un plano continuo que será considerado en la modelización del talud actual.

Así mismo, de la información brindada por el monitoreo [2] se indica que en el registro de los pozos inclinométricos se evidencian planos de deslizamiento a diferentes profundidades, dependiendo de la ubicación del inclinómetro. Concluyendo que en todo el talud de las bermas de estabilización del vertedero los desplazamientos son bajos, y el plano de deslizamiento situado en la parte baja del talud, se encuentra a los 48 m de profundidad.

3.5 Controles topográficos

El control topográfico en las bermas de estabilización del vertedero se ha venido realizando desde finales del año 2007 a través de una red de 31 mojones topográficos a distintos niveles de las bermas, desde el MS-01 al MS-30, e hito de control. Dichos mojones topográficos se han montado y monitoreado de forma progresiva a la construcción del vertedero y sus bermas de estabilización. Los mojones MS-19, MS-24 y MS-30 han sido movidos de su posición inicial con el objetivo de tener una mejor visualización de los mismos. Actualmente se controlan 30 mojones topográficos debido a la carencia de línea de vista hacia el mojón MS-25, situado en la cota 2045 msnm y cercano al desagüe de fondo [2].

El máximo desplazamiento total acumulado que se registra en las bermas de estabilización del vertedero es de 70mm en el MS-15 ubicado en la berma 2195 msnm, es decir, a media altura de todo el talud y a una velocidad promedio de 16mm/año. La velocidad promedio máxima registrada es de 18mm/año, en el MS-30, ubicado en la cota 2075msnm, en la parte baja del talud, cerca de la piscina del Cuenco Amortiguador. Cabe indicar que en los desplazamientos mencionados en esta sección no se toma en cuenta la componente en “z” debido a que ésta dejó de monitorearse en febrero del 2011.

En el Grafico No. 3.2, se presenta el azimuth promedio de movimiento, calculado en base al registro histórico del movimiento de los mojones.

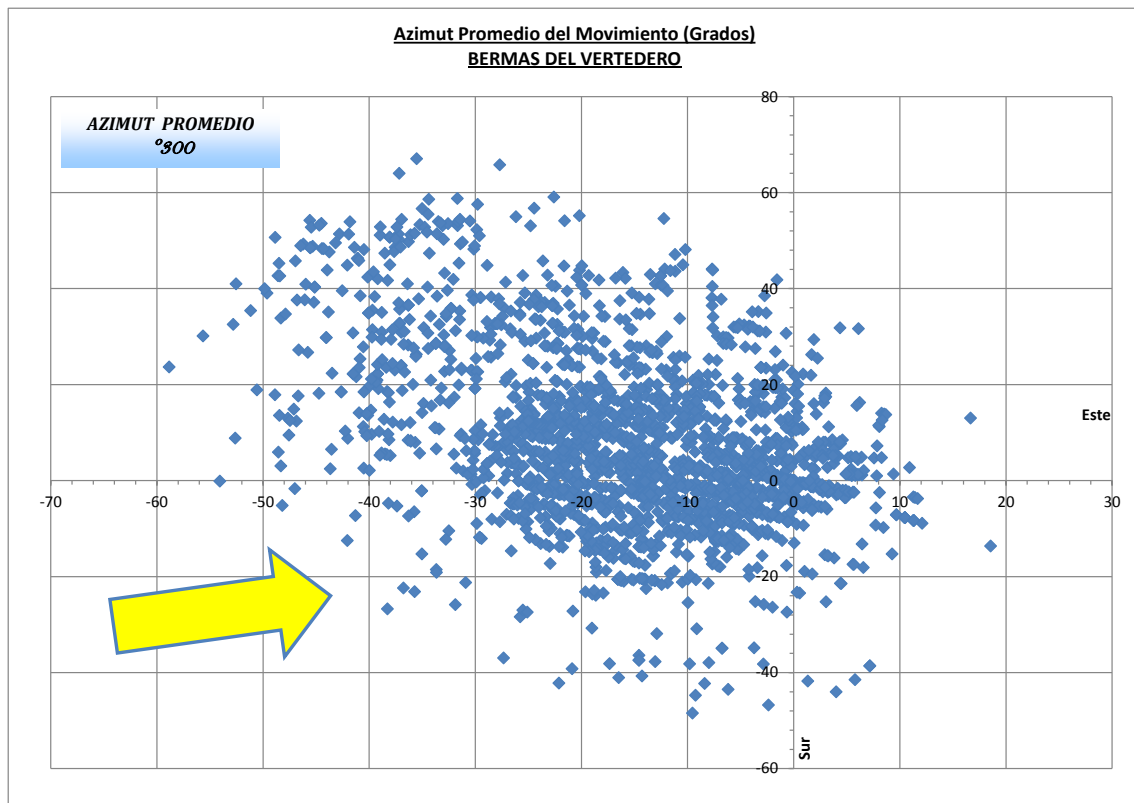


Grafico No. 3.2: Azimut del Movimiento del talud. (Datos Monitoreo Hidropaute [2]). Indica tendencia del movimiento hacia el Noreste.

Las velocidades de movimiento de los mojones han llegado a una disminución tal que desde septiembre de 2009 a la actualidad circundan valores inferiores a 0,05 mm/día y sigue en decrecimiento. La tendencia del movimiento de toda la masa es hacia el noroeste con un azimut aproximado a los 300°. Aparentemente, de acuerdo a las velocidades de los movimientos, las bermas del vertedero tienden hacia su estabilización o encontrar su punto de reposo. Los asentamientos totales acumulados registrados hasta febrero del 2011, registran sus máximos valores entre los 20 mm y 30 mm, correspondientes a los mojones topográficos MS-7, MS-8, MS-9, MS-10, MS-14, MS-15 y MS-20. [2]. La ubicación de los Mojones topográficos se presenta en el anexo No. 03.

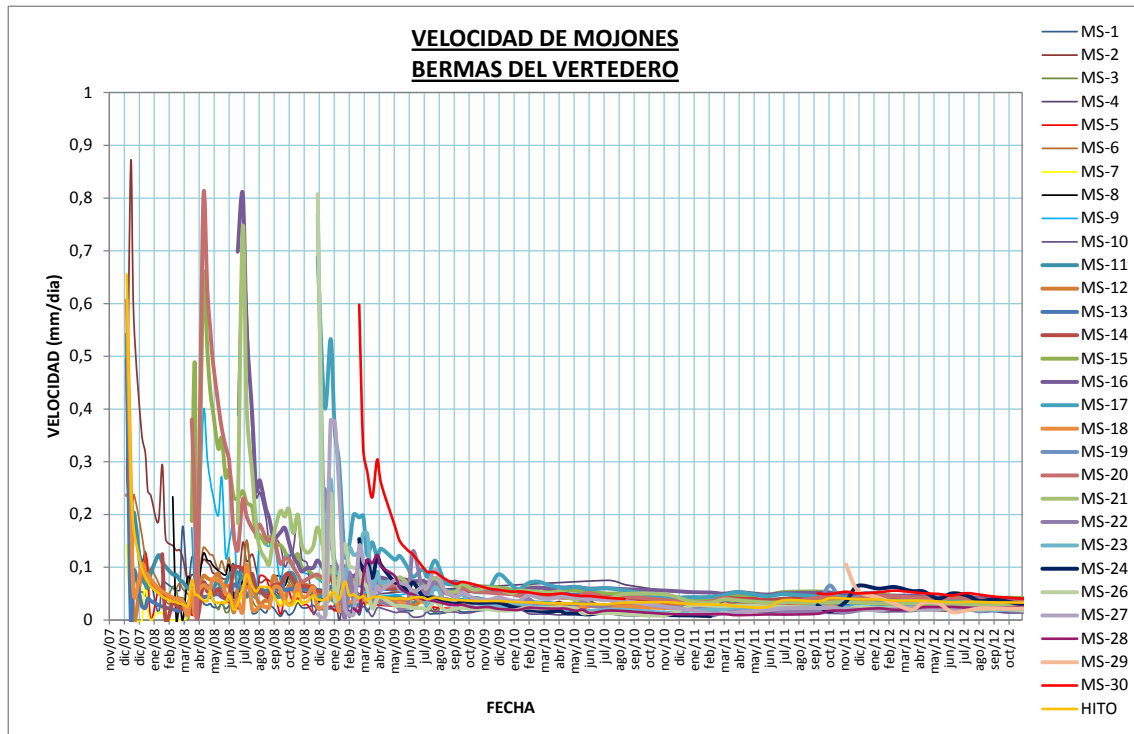


Grafico No. 3.3: Variación de velocidad de mojones en talud sobre el vertedero [2]. Se observa la disminución de velocidad de movimiento de macizo y la tendencia a estabilizarse. Las mayores velocidades de movimiento se da en los primeros meses de monitoreo, luego de la excavación y conformación del talud.

En base a los datos proporcionados por el monitoreo de Hidropaute [2], en el grafico No. 3.3 se representa la variación de la velocidad de movimiento hasta octubre de 2012 y podemos apreciar claramente que la velocidad de los mojones disminuye considerablemente a partir del año 2009. En el cuadro 3.5 se aprecian los desplazamientos, asentamientos parciales y acumulados a septiembre de 2013, en base a datos proporcionados por monitoreo de Central Mazar Hidropaute. En el anexo No. 08 se puede apreciar la vista en planta del resultado del monitoreo de los mojones topográficos, con la dirección de movimiento de los mojones implantados en el talud sobre el vertedero.



DESPLAZAMIENTOS, ASENTAMIENTOS PARCIALES Y ACUMULADOS			
MOJON TOPOGRÁFICO	DESP. OCT./2012	DESP. SEPT./2013	INCREMENTO
	(mm)	(mm)	(mm)
MS-1	42,48	54,07	11,59
MS-2	26,16	41,93	15,77
MS-3	42,87	48,46	5,60
MS-4	39,41	40,14	0,72
MS-5	40,95	43,33	2,38
MS-6	60,54	63,43	2,89
MS-7	45,07	46,07	1,00
MS-8	43,07	44,62	1,55
MS-9	39,34	39,70	0,37
MS-10	15,22	20,73	5,51
MS-11	45,25	54,01	8,76
MS-12	50,64	54,01	3,37
MS-13	65,67	67,56	1,89
MS-14	62,52	66,31	3,79
MS-15	66,55	69,66	3,11
MS-16	61,83	62,69	0,86
MS-17	44,45	45,67	1,22
MS-18	46,24	51,70	5,46
MS-19	6,02	8,48	2,46
MS-20	56,60	57,49	0,89
MS-21	39,57	45,40	5,83
MS-22	17,77	26,81	9,05
MS-23	23,04	27,22	4,17
MS-24	1,53	15,56	14,03
MS-26	24,95	28,64	3,69
MS-27	23,24	30,91	7,67
MS-28	16,89	31,47	14,58
MS-29	6,00	8,28	2,28
MS-30	16,24	29,10	12,86
HITO	58,60	59,16	0,56

Cuadro No. 3.5: Desplazamientos, asentamientos parciales y acumulado a Sep. 2013. Adaptado en base a datos proporcionados por monitoreo de Central Mazar Hidropaute [2].



3.6 Conclusiones Capítulo III

Una vez analizados los desplazamientos de mojones e inclinómetros, se puede deducir que, los movimientos de los inclinómetros en las bermas de estabilización del vertedero son mínimos en sub-suelo y mayores en superficie pero con direcciones similares. Los desplazamientos más relevantes se producen a mitad del talud y la tendencia del movimiento de todo el macizo hacia el noroeste (N300°E), confirmando lo predicho en los estudios de INECEL [1] y lo analizado en el capítulo II.

El volumen promedio de movimiento es aproximadamente de 5 millones de metros cúbicos. Se podría decir en forma general que el vertedero se presenta estable.



CAPÍTULO IV: PARAMETROS HIDROLÓGICOS, GEOTÉCNICOS Y MODELIZACIÓN DEL TALUD

4.1 Introducción

En este capítulo se compila y evalúa las características físico-mecánicas representativas de los materiales en el macizo de roca presentes en el sitio de emplazamiento del talud, en base a la información de las investigaciones geotécnicas, los ensayos in situ y de laboratorio realizados en estudios y trabajos previos a esta tesis, Estudios Sweco & Botconsult (1998) [1], Diseño ejecutivo Consorcio Gerencia Mazar (2006) [3] y Estudios Geofísicos métodos: Sísmica de Refracción y Resistividad Eléctrica (2005) [8]. Como ya se ha indicado, no se ha considerado en el análisis la primera capa de material coluvial suelto, debido a que ésta capa se eliminó durante la excavación y conformación del talud.

4.2 Parámetros hidrológicos

La estabilidad del talud está estrechamente ligada a la presencia de un nivel freático en el macizo y la reacción de éste ante la presencia de agua. El comportamiento del macizo en relación con el agua está determinado por los factores hidrogeológicos de precipitación, infiltración, evapotranspiración y permeabilidad.

En cuanto a la precipitación de la zona se determinó que la crecida máxima probable del río Paute en la zona del proyecto es 7500 m³/seg siendo este valor la base para el diseño de los vertederos [7]. De acuerdo a los registros históricos con los que se cuenta tanto en la Central Mazar como en San Pablo, el mes de mayor pluviosidad es junio [1], esto se refleja también en la lecturas de monitoreo de piezómetros ubicados en la Central Mazar, ya que durante esa época del año sube el nivel freático, como se nota en el Gráfico No. 3.1.

Se debe considerar que el agua tiene un doble papel negativo en la estabilidad. Por un lado reduce los parámetros de resistencia al corte al aumentar las presiones intersticiales y por otro aumenta el peso del terreno y las fuerzas desestabilizadoras lo que incrementa los esfuerzos de corte en grietas y discontinuidades.

En el Grafico No. 4.1, se muestra una recopilación de datos de pluviometría registrados entre los años 2007 y 2009, identificando en junio de cada año el mes de mayor registro.

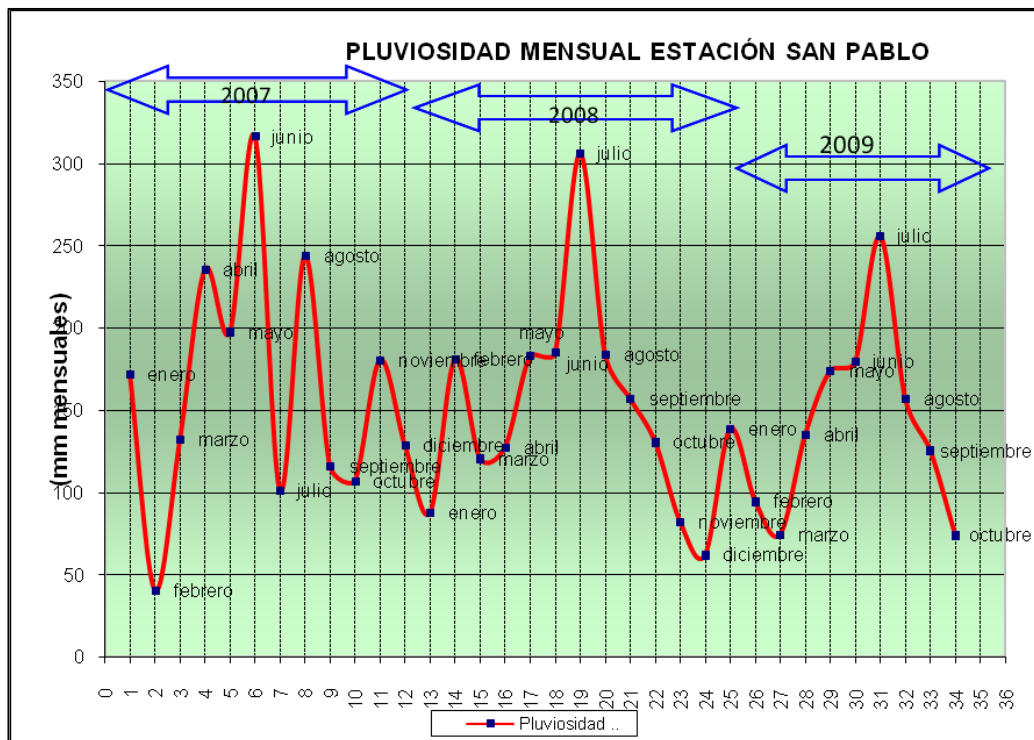


Gráfico No. 4.1: Pluviosidad mensual para la zona del proyecto Mazar, desde enero de 2007 hasta octubre de 2009, los valores pico ocurren en el mes de julio del 2007, 2008 y 2009. (HIDROPAUTE) [7]

4.2 MODELIZACION DEL TALUD

4.2.1 Perfiles característicos

En el Anexo No. 6 se representan cuatro perfiles correspondientes a diferentes zonas del talud sobre el vertedero, mientras que la ubicación de los mismos se los puede apreciar en el anexo No. 07.

Para el análisis probabilístico del talud, se considera el perfil signado como B-B, en los planos PE-V14-001 de los estudios Sweco & Botconsult (1998) [1] y Diseño Ejecutivo Consorcio Gerencia Mazar (2006) [3].

Se eligió este perfil como más representativo por los siguientes motivos:

- Es el perfil más largo, alto y de mayor pendiente, que atraviesa toda la ladera utilizada en la construcción del talud, por lo tanto es el que mejor representará la situación de estabilidad de la misma.

- Se cuenta con mayor cantidad de registros de monitoreo, ya que el perfil coincide con ubicación de inclinómetros, piezómetros y mojones topográficos.
- La resultante de los vectores de movimiento registrados con la instrumentación y monitoreo se alinean el perfil y son perpendiculares al pie del talud. Se lo puede verificar en el Anexo No. 8 Vectores de movimiento, en el que se identifican los mojones topográficos del MS- 11 al MS-17.

El Gráfico 4.2 muestra la estratigrafía supuesta del perfil B-B' a lo largo de la ladera antes de realizar los trabajos de excavación para la construcción de la central Mazar. Se identifican tres estratos: el superficial con material coluvial y roca altamente fracturada, el segundo con roca fracturada y el tercero y más profundo en roca sana. Es decir las capas superficial y segunda definidas en el capítulo II se consideran como una sola.

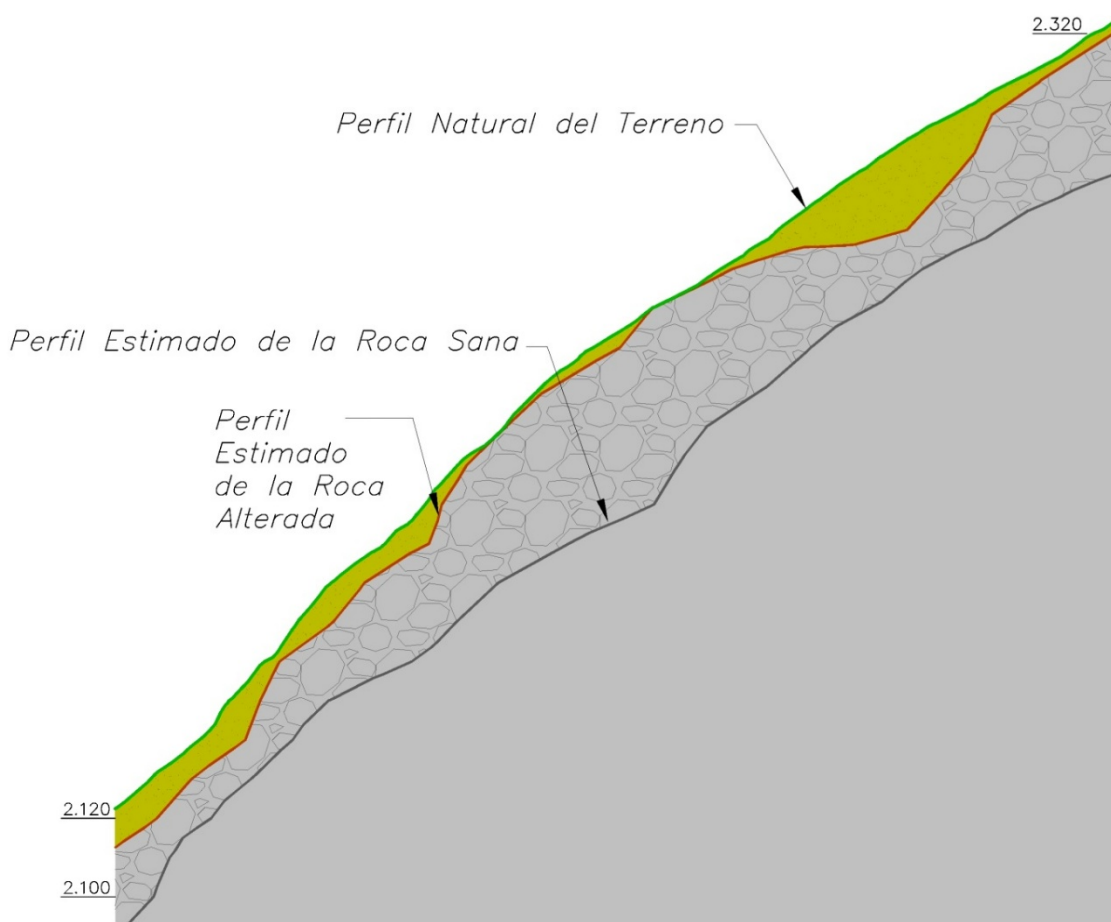


Grafico No. 4.2 Estratigrafía del Perfil B-B' a lo largo de la ladera original antes de excavaciones para construcción de la Presa Mazar. Se observan tres estratos, 1 Coluvial suelto, 2 Roca Alterada, 3 Roca Sana

Durante los trabajos de excavación para la conformación del talud se cortó desde las coberturas coluviales hasta la roca de buena calidad, pasando por los estados de meteorización intermedios. El Gráfico 4.3 muestra la supuesta estratigrafía del perfil B-B' después de la construcción del talud. Según este modelo estratigráfico prácticamente todo el talud se encontraría en roca sana.

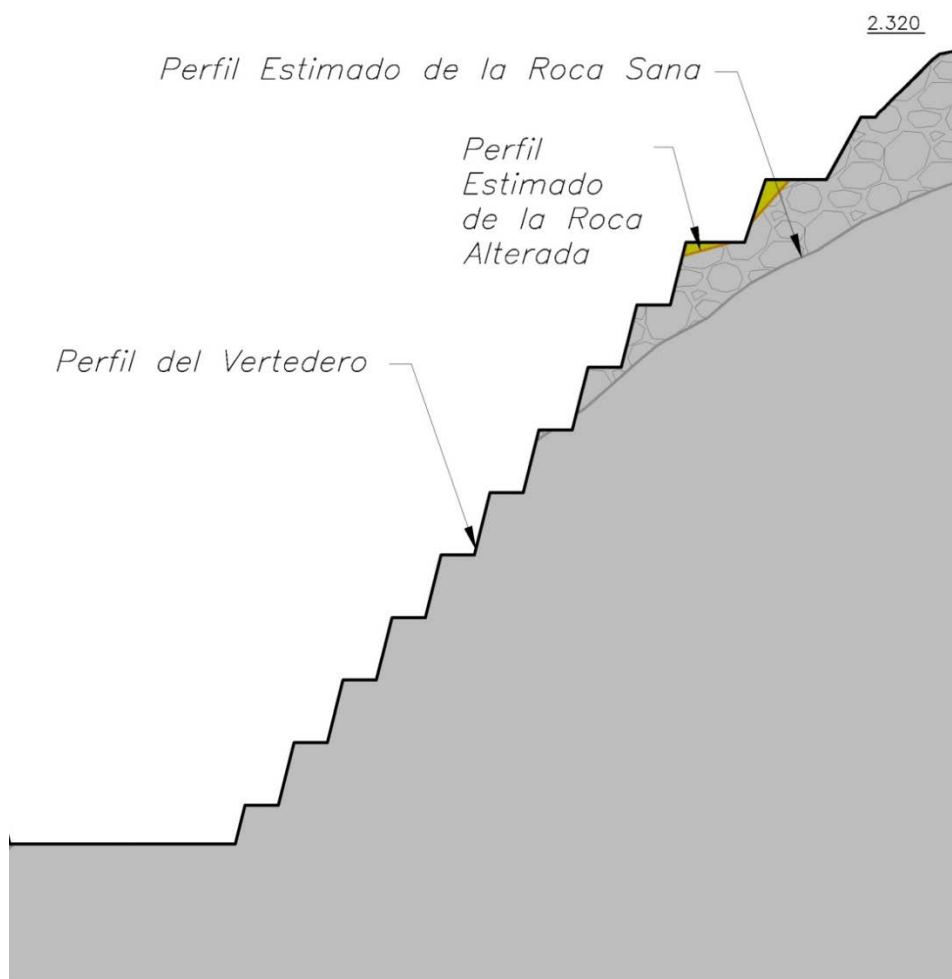


Grafico No. 4.3: Estratigrafía del perfil B-B' después de la construcción del talud. Prácticamente todo el talud se encontraría en roca sana

Para el caso de desprendimientos puntuales de menor magnitud, se han realizado trabajos de estabilización con hormigón lanzado y anclajes que consideran el hecho de que debido al proceso de excavación, se dio la meteorización del estrato de roca sana que quedo expuesta y pequeños tramos en los que quedo material coluvial suelto. Por lo que se realizaron los siguientes trabajos de estabilización:



- Anclajes autoperforantes de 12 metros, asociados a drenajes de longitud similar, inyectados y protegidos contra el riesgo de corrosión, incluso con protección catódica.
- Capa superficial de hormigón lanzado sobre el talud expuesto.
- Drenaje superficial con zanjas de coronación.

4.2.2 Parámetros geotécnicos

No existen datos directos de análisis de la roca en el sitio de desplante, sin embargo con la finalidad de avanzar en el desarrollo de la tesis se asumirán algunos valores que se utilizaron en el Diseño Ejecutivo de Consorcio Gerencia Mazar (2006) [3], valores que se basan en los sondeos realizados en la margen derecha de la presa Mazar en los años 1984 y 1994 y son validados en los estudios de Sweco & Botconsult (1998) [1]. Se indica en [3] que HIDROPAUTE aún dispone de la mayor parte de los registros geológicos de las investigaciones realizadas en 1984, 1994 y 1996, que incluyen registro de perforaciones.

En el Diseño ejecutivo 2217-MC-V14-002-a (2006) [3] indica que con respecto a los métodos empíricos de clasificación de macizos rocosos mencionados, debe recordarse que los mismos no deben ser considerados como métodos exactos, sino más bien como métodos de estimación de la calidad del macizo rocoso. Dichos métodos fueron y están permanente sometidos a ajustes por varios autores, e incluso por los mismos autores del método. Por lo tanto, tales métodos no deben ser tomados como normas rígidas. La función del diseñador es la de ajustar las estimaciones de acuerdo a su criterio y experiencia. Por tal motivo, cuando se estimó conveniente se añadieron interpretaciones que resultan tanto del carácter particular del sitio, como de la obra considerada. Así también se justificando que esta tesis se tomen como variables los parámetros geotécnicos dentro los rangos propuestos por Bieniawski⁶ en la clasificación de los macizos rocosos.

Para determinar las características geotécnicas de la roca, se consideró la clasificación de Bieniawski, que parte de los siguientes parámetros geomecánicos [10]:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa.

⁶ Bieniawski = clasificación geomecánica que permite hacer una clasificación de las rocas 'in situ' y estimar el tiempo de mantenimiento y longitud de un vano

- Grado de fracturación en términos del RQD⁷
- Espaciado entre discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condición de las infiltraciones de agua.
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Este sistema de clasificación desarrollado por Bieniawski en 1973, permite relacionar índices de calidad RMR⁸, *Rock Mass Rating*, cuyos valores oscilan entre 0 y 100, con parámetros geotécnicos del macizo. Distingue cinco clases de macizos, a los que les asigna una calidad y unas características geotécnicas según el RMR calculado, de acuerdo a lo mostrado en el cuadro 4.1:

Calidad de los macizos rocosos en relación al índice RMR						
Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión		Angulo de Fricción	
			Kg/c	KN/m ²		
I	Muy	100-81	>	>	> 45°	
II	Buena	80-61	3 - 4	294	392	35°-45°
III	Media	60-41	2 - 3	196	294	25°-35°
IV	Mala	40-21	1 - 2	98	196	15°-25°
V	Muy Mala	<20	< 1	< 98	< 15°	

Cuadro 4.1: Clase, calidad y valoración del RMR según Bieniawski. La columna sombreada ha sido agregada al cuadro original para el desarrollo de este trabajo de tesis, con la finalidad de tener valores de la cohesión en KN/m² [7] y [10]

El cuadro No. 4.2, presenta los horizontes característicos y sus parámetros geotécnicos asumidos en el Diseño ejecutivo Consorcio Gerencia Mazar (2006) para el análisis determinístico de estabilidad del talud [3] a partir del índice RMR para roca y tomando los rangos de valores conocidos de la zona del embalse para los coluviones y materiales sueltos determinados en base a ensayos por Sweco & Botconsult [1]:

Horizonte	Tipo de Roca	Clase RMR	Cohesión KPa	Fricción (°)	Densidad gr/cm ³ (Muestreo)
1	Coluvial y material suelto.	V	50	20	1,4
2	Roca débil	IV	150	35	1,93
3	Roca mediana	III	245	30	2,03

⁷ RQD= (*Rock Quality Designation*) porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo.

⁸ RMR = (*Rock Mass Rating*, clasificación geomecánica desarrollada por Bieniawski)



4	Roca buena	II	343	38	2,29
---	------------	----	-----	----	------

Cuadro No.4.2: Parámetros Geotécnicos asumidos en el Diseño ejecutivo Consorcio Gerencia Mazar (2006) [3]

De acuerdo al Diseño ejecutivo Consorcio Gerencia Mazar (2006) [3], se puede concluir que las características geotécnicas de la roca en el talud cumplen con valores de RMR (tipo II y III, según Bieniawski), es decir gran parte del talud después del corte se encuentra en roca de calidad media tipo III y roca de calidad buena tipo II. Debiendo considerar que los valores de cohesión para las capas con roca tipo II, pueden variar por efectos de la descompresión al inicio del vertedero donde el corte de talud alcanza la mayor profundidad. La mayor parte del talud está en los horizontes 3 y 4, existiendo materiales de los horizontes 1 y 2 únicamente en la parte alta sobre la cota 2200 msnm donde no se realizaron trabajos de excavación.

Debido a que en esta investigación se considera la estabilidad global del talud, y se tiene en cuenta el posible movimiento de bloques de gran magnitud, que podrían afectar al funcionamiento del proyecto Mazar, se consideran variables para el análisis probabilístico los valores de cohesión y ángulo de fricción para el estrato de roca buena o sana.

Para el análisis probabilístico se plantea que en el horizonte 4 conformado por roca sana la cohesión y el ángulo de fricción varíen dentro de los rangos establecidos en la clasificación RMR de Bieniawski.

En el cuadro No. 4.3 se muestran los valores y rangos asumidos para los horizontes 3 y 4 del perfil B-B' que son los valores utilizados en el análisis de estabilidad probabilístico mediante el cálculo del Factor de Seguridad.

Rango de variación para parámetros geotécnicos del estrato de roca					
Horizonte	Probable estado de la roca	Clase Roca según clasificación Bieniawski	Cohesión (KPa)	Fricción (°)	Densidad (gr/cc)
3	Roca mediana o alterada	III	245	30	2.03
4	Roca buena o sana	II	294 - 392	35 - 45	2.29

Cuadro No. 4.3: Parámetros Geotécnicos utilizados para el análisis probabilístico

4.2.3 Criterio de rotura

Un criterio de rotura es definido como una superficie restrictiva en términos de las tensiones principales. Debido a la dificultad que implica el montaje

experimental en tres dimensiones, los criterios de rotura empíricos son bidimensionales y se expresan en función de las tensiones principales.

De acuerdo a González de Vallejo (2005) [10], aunque existen varios métodos para la evaluación de la resistencia de la matriz rocosa, los más conocidos son el de “Mohr Coulomb” y el de “Hoek y Brown”. La principal diferencia entre ambos es que el primero es un criterio lineal y el segundo es no lineal. A pesar de que el criterio de Hoek y Brown es el método más adecuado para analizar el comportamiento de rocas, no se lo considera en esta investigación, ya que depende de factores que deben ser determinados en ensayos de laboratorio y al no contar con estos datos de laboratorio, se procedería a estimarse a partir de tablas de la literatura existente, lo que aumentaría la incertidumbre en los datos para el análisis de estabilidad probabilístico. Por lo tanto, se ha utilizado el criterio de Mohr Coulomb.

4.2.3.1 Criterio de rotura de Mohr Coulomb

Este criterio expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones, obteniéndose la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de rotura mediante la expresión matemática:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (4.1)$$

En donde:

τ = tensión tangencial en el plano de rotura

c = constante de la cohesión del suelo o roca

σ_n = tensión normal que actúa en el plano de rotura

φ = ángulo de rozamiento o fricción interno del suelo o roca

En el Gráfico No. 4.4 se presenta la forma general del criterio de rotura de Mohr- Coulomb, en función de los esfuerzos normales y tangenciales. Para un estado tensional situado por debajo de la envolvente de falla, no se producirá la rotura, no así cuando se encuentre sobre la envolvente de falla.

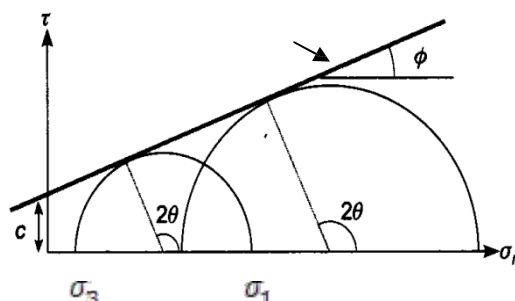




Gráfico No. 4.4 Círculos de Mohr y envolvente de falla [10]

El criterio de Mohr – Coulomb implica que tiene lugar una fractura por corte al alcanzarse la resistencia de pico del material. La gran ventaja de utilizar este criterio es su sencillez, aunque presenta inconvenientes relacionados con el comportamiento tensión-deformación no lineal de los macizos rocosos. Suele ser utilizado teniendo en cuenta que se deben adoptar valores para la cohesión y para el ángulo de fricción representativos del macizo rocoso [10].

4.2.4 Tipo de movimiento

De acuerdo a la descripción presentada en [12], en el deslizamiento de traslación la masa en movimiento se desplaza hacia fuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Mientras que, un movimiento de rotación trata de auto estabilizarse, uno de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo.

Para el análisis de estabilidad global, ya que el movimiento registrado es hacia afuera y abajo en el estrato rocoso, se asume que la superficie de rotura se desarrolla rompiendo el macizo rocoso de forma plana. El deslizamiento ocurre cuando la inclinación del plano de falla es mayor que el ángulo de fricción interno.

4.3 Conclusiones Capítulo IV

Los parámetros geotécnicos de cohesión y fricción para el análisis de estabilidad del talud sobre el vertedero en la central Mazar, de acuerdo a [1], fueron definidos en base al índice de calidad de la roca RMR y pruebas de laboratorio. Mientras que la densidad de cada estrato, fue definida principalmente en base a resultados de ensayos de campo.

Para el desarrollo de la tesis, se parte de la hipótesis de que el plano de falla principal pasa por el macizo rocoso, esta hipótesis se sustenta en los resultados obtenidos en el monitoreo de inclinómetros.



Para el análisis probabilístico motivo de esta investigación, se consideran como factores geotécnicos variables cohesión y ángulo de fricción del estrato de roca fresca.

El criterio de rotura utilizado para el cálculo es estabilidad es el lineal de Mohr – Coulomb.

Para el análisis de estabilidad global se tomará en cuenta el posible movimiento de bloques de gran magnitud y

Para el análisis de estabilidad global se asume que la superficie de rotura es de forma plana.

Para el análisis probabilístico se consideran los parámetros geotécnicos presentados en el cuadro No. 4.3



CAPITULO V: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

5.1 Introducción

Para definir la estabilidad de un talud, es practica común el obtener un factor de seguridad (FS) en base al análisis de un modelo matemático que simula la estabilidad. Sin embargo, no todos los factores que afectan a la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque asumiendo una sola superficie de falla sin variación de parametros geotécnicos no produce resultados confiables. A pesar de las debilidades de un modelo simplificado, determinar el factor de seguridad asumiendo varias superficies probables de falla permite contar con información muy util para la toma de decisiones[16].

Se pueden estudiar superficies de deslizamiento planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de ellas. La mayoría de métodos de análisis de estabilidad de taludes asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares, principalmente. Sin embargo, el mecanismo de falla en roca así como en suelos no-isotrópicos requieren de nuevos enfoques y del estudio de superficies de falla no-circulares .

Para obtener un análisis de estabilidad completo sobre un talud en roca se deben considerar todos los posibles mecanismos de falla. Resumiendo la bibliografía consultada [10], [16] y [22], se puede decir que existen cuatro mecanismos principales de falla que se muestran en el gráfico No. 5,1. El primero considera el comportamiento de la roca intacta y los tres siguientes consideran el comportamiento de estructuras pre-existentes, cuyas condiciones de ocurrencia se describen a continuación:

a) Considerar la roca intacta: No se considera en el análisis de estabilidad el comportamiento de las estructuras pre-existentes como fallas y diaclasas. El

análisis de estabilidad se lo hace igual que en los taludes en suelo. Este mismo mecanismo también puede considerarse para el extremo opuesto, es decir, rocas tan fracturadas o diaclasadas que su comportamiento es similar al de un suelo y no es gobernado por ninguna familia de fallas o diaclasas.

- b) Falla plana:** La superficie de deslizamiento se da a lo largo de una discontinuidad subparalela al talud, cuyo buzamiento es menor que el del talud y mayor que el ángulo de fricción interno de la discontinuidad.
- c) Falla en cuña:** ocurre cuando la masa de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud, siendo la inclinación de las superficies de falla sea mayor que el ángulo de fricción interna.
- d) Vuelco:** el buzamiento de discontinuidades es opuesto al talud.

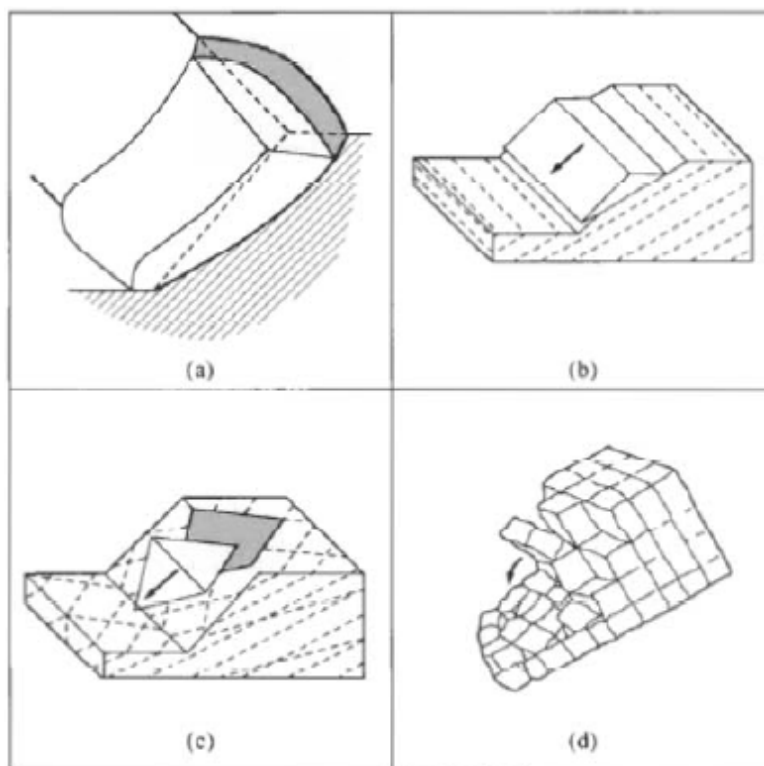


Gráfico No. 5.1: Metodologías para análisis de taludes más utilizadas en suelos tropicales [22] (a) falla en roca intacta, (b) falla plana, (c) falla en cuña, (d) vuelco.

Fuente: <http://materias.fi.uba.ar/6408/13b%20Estabilidad%20de%20taludes%20rocas.pdf>
Página web de la Facultad de Ingeniería de la universidad de Buenos Aires

En esta tesis debido a la disponibilidad de datos se realiza el análisis de estabilidad según el mecanismo de roca intacta, escenario (a) del gráfico No.



5,1, es decir, se consideran las características geotécnicas de la roca y no se consideran las fallas y diaclasas existentes en el macizo rocoso.

El hecho de considerar en esta tesis un solo mecanismo de falla del talud, supone una limitación al análisis de estabilidad de un talud en roca. Se asume esta limitación debido a la carencia de datos sobre los parámetros geotécnicos que definen las familias de diaclasas y/o fallas que gobiernan el talud sobre el vertedero de la presa de la central Mazar. El análisis de la estabilidad del talud es realizado en base a los parámetros de cohesión y fricción que se disponen únicamente del macizo rocoso. Cabe destacar el hecho de que tras las excavaciones realizadas para la construcción del talud sobre, éste quedó prácticamente en su totalidad en el estrato de roca considerada de buena calidad.

Los métodos para el análisis de estabilidad del talud con el mecanismo (a), pueden ser entre otros por Equilibrio Límite o por Métodos Numéricos como el Tenso-Deformacional [16].

El método de Equilibrio Límite, requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no requiere información sobre la relación esfuerzo y deformación que sufre un determinado material además asume que en el caso de una falla que las fuerzas actuantes y las resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla y esto equivalente a un factor $FS = 1.00$, es decir en equilibrio límite, a punto de fallar. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en dovelas. Con este método se asume que el factor de seguridad es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla [16].

El método Tenso-Deformacional se centra en la relación tensión-deformación que se produce en un determinado material durante el proceso de deformación hasta llegar al punto de rotura, esta relación controla la resistencia del material. En este proceso de deformación se generan varios estados tensionales en las distintas zonas del talud y este método de análisis de estabilidad permite modelar estos cambios a partir de un modelo geométrico representativo, incluyendo las características litológicas y freáticas, entre otras, que se tengan del talud, obteniéndose valores correspondientes a los desplazamientos, deformaciones y tensiones que se van generando a partir de la resolución de las ecuaciones de plasticidad mediante el método de los elementos finitos [16].

En esta investigación se ha decidido utilizar el método de equilibrio límite, porque no se dispone de algunos datos característicos del macizo rocoso



requeridos en el método tenso-deformacional, entonces el método de equilibrio límite permite sintetizar el análisis probabilístico con menos incertidumbres.

5.1.1 Método de equilibrio límite

En el análisis por el método equilibrio límite no se requiere conocer el comportamiento de esfuerzo y deformación de los materiales que conforman el talud de análisis. Sin embargo, es necesario tener un conocimiento adecuado de los parámetros que determinan la resistencia del suelo como por ejemplo cohesión y fricción [10].

Según los preceptos de la teoría del equilibrio límite, la estabilidad de los taludes es determinada a partir del cálculo del factor de seguridad (FS) en la región del talud que presenta la mayor probabilidad de deslizamiento. Esta región crítica está limitada por la superficie de falla que presenta el menor FS. Debido a lo anterior, se requieren métodos que puedan evaluar todas las posibles zonas y encontrar la que representa menor seguridad en el análisis [14].

El concepto de seguridad se conoce como la división de la Resistencia entre la Solicitación del sistema:

$$FS = \frac{\text{Resistencia}}{\text{Solicitud}} \quad (5.1)$$

Existen varias metodologías para el cálculo de estabilidad de taludes, las cuales se diferencian principalmente por el tipo de geometría de falla que consideran, y por el tipo de acciones que se consideran en el análisis. En el cuadro No. 5.1 se presenta un resumen de las principales metodologías utilizadas para el cálculo de factores de seguridad por equilibrio límite.

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
<i>Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)</i>	<i>Circulares</i>	<i>De fuerzas</i>	<i>Este método no tiene en cuenta la fuerza entre dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.</i>
<i>Bishop simplificado (Bishop 1955)</i>	<i>Circulares</i>	<i>De momentos</i>	<i>Asume que todas las fuerzas entre dovelas son cero. Reduciendo el número d incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.</i>



<i>Janbú Simplificado (Janbú 1968)</i>	<i>Cualquier forma de superficie de falla</i>	<i>De fuerzas</i>	<i>Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobre determinada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo Janbú utiliza un factor de corrección para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.</i>
<i>Sueco Modificado U.S. Army Corps of Engineers (1970)</i>	<i>Cualquier forma de superficie de falla</i>	<i>De fuerzas</i>	<i>Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos</i>
<i>Lowe y Karafrath (1960)</i>	<i>Cualquier forma de superficie de falla</i>	<i>De fuerzas</i>	<i>Asume que la fuerza entre partículas están inclinadas a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.</i>
<i>Spencer (1967)</i>	<i>Cualquier forma de superficie de falla</i>	<i>Momentos y fuerzas</i>	<i>Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.</i>
<i>Morgenstern y Price (1965)</i>	<i>Cualquier forma de superficie de falla</i>	<i>Momentos y fuerzas</i>	<i>Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.</i>
<i>Sarma (1973)</i>	<i>Cualquier forma de superficie de falla</i>	<i>Momentos y fuerzas</i>	<i>Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficientes sísmicos. Satisface todas las condiciones de equilibrio, sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.</i>

Cuadro No. 5.1: Metodologías para análisis de taludes más utilizadas en suelos tropicales [16]

La elección del método de análisis más adecuado en cada caso dependerá de: las características geológicas y geomecánicas de los materiales (suelos o macizos rocosos), los datos disponibles del talud y su entorno (geométricos, geológicos, geomecánicos, hidrogeológicos, etc.) y el alcance y objetivos del estudio, grado de detalle y resultados que se espera obtener [10].

Para esta investigación, se ha decidido utilizar el Método de Morgenstern Price, debido a los datos disponibles y su precisión. En el Manual de Mecánica de Suelos y Cimentaciones de Ángel Muelas Rodríguez [9] se indica que el uso del



método supone un avance hacia una mejor solución en el cálculo de la estabilidad del talud por ser más preciso que el método de spencer, teniendo cuidado en la convergencia del cálculo y en no usar ángulos negativos para la resultante de la fuerza interdovelas.

5.1.2 Metodología de cálculo Morgenstern Price

Este método (Morgenstern-Price, 1965) es aplicable a cualquier tipo de superficie de falla, circular o no circular, y considera como condiciones de equilibrio estático, el equilibrio de fuerzas y de momentos. Asume que la inclinación de las fuerzas interdovelas varía de acuerdo a una función arbitraria:

$$X/E = \lambda \cdot f(x) \quad (5.2)$$

En donde $f(x)$ es la función que varía de forma continua a lo largo de la línea de falla, y λ es una constante a ser evaluada. Para una función dada $f(x)$, los valores de λ y F_s deben cumplir los equilibrios globales de momentos y fuerzas, de forma que $F_s = F_m = F_f$, (Gráfico No. 5.2), siendo F_m el factor de seguridad respecto al equilibrio de momentos, y F_f el factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerzas, cuyas ecuaciones son:

$$F_m = \frac{\sum \{c'l R + (P - u l) R \tan \varphi'\}}{\sum Wx - \sum Pf + \sum kW e \pm Aa + Ld} \quad (5.3)$$

$$F_f = \frac{\sum c' \cos \alpha + \sum (P - u l) \tan \varphi' \cos \alpha}{\sum P \sin \alpha + \sum kW \pm A + L \cos \omega} \quad (5.4)$$

Una de las variables claves en ambas ecuaciones es P , la fuerza normal en la base de la dovela, que viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{\left[W - (X_R - X_L) - \frac{c'l \sin \alpha}{F} + \frac{ul \tan \varphi' \sin \alpha}{F} \right]}{m_a} \quad (5.5)$$

En donde:

$$m_a = \cos \alpha + \frac{(\text{sen } \alpha \tan \varphi')}{F} \quad (5.6)$$

En la expresión 5.5 y 5.6. F es F_m , cuando P es sustituida en 5.3, y F es F_f cuando se la sustituye en 5.4 [7].

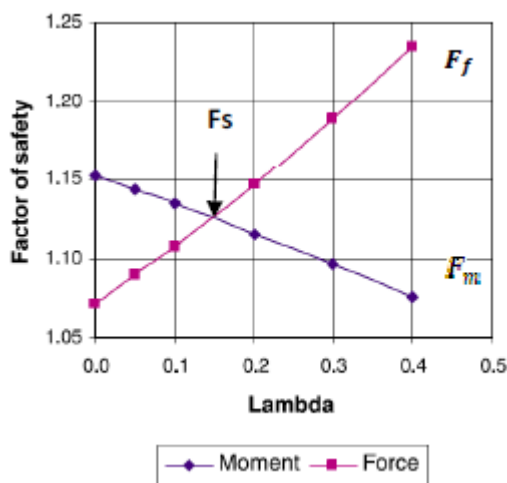


Gráfico No. 5.2: Situación típica para una superficie de deslizamiento compuesta: para un rango de valores λ y una función dada $f(x)$. Se han graficado los valores de F_m y F_f . La intersección de las dos curvas determina los valores de F_s y λ [7].

En el gráfico No. 5.3 se representa la geometría y fuerzas que actúan en una dovela desde el punto de vista del método de Morgenstern-Price.

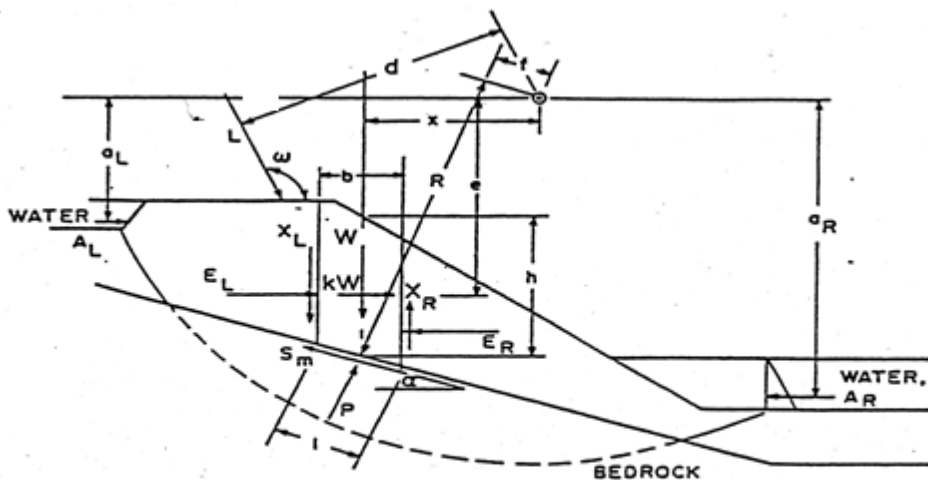


Gráfico 5.3: Geometría y fuerzas que actúan en una dovela. Método de Morgenstern-Price [7].



Nomenclatura:

W	Peso total de la dovela
R	Radio del brazo del momento asociado
X	Componente vertical de la fuerza interdovela
E	Componente horizontal de la fuerza interdovela
P	Fuerza Normal en la base de la dovela
x	Distancia horizontal desde el centro de la dovela hasta eje de rotación
f	Distancia perpendicular desde P , al centro de rotación
k	Coeficiente sísmico para la fuerza horizontal
e	Distancia vertical, desde el centroide de cada dovela al centro de rotación
A	Resultante de las fuerzas ejercidas por el agua
a	Distancia perpendicular desde la fuerza A, hasta el centro de rotación
L	Carga Unitaria
d	Distancia perpendicular desde L , hasta el centro de rotación
α	Ángulo de la tangente en el centro de la base de la dovela con la horizontal
l	Longitud de la base de la dovela
F_f	Factor de seguridad con respecto al equilibrio de Fuerzas
F_m	Factor de seguridad con respecto al equilibrio de Momentos

Se deben realizar las siguientes consideraciones al utilizar el método Morgenstern-Price para calcular el equilibrio límite de las fuerzas y de momentos de los bloques individuales:

- Los planos divididos entre bloques son siempre verticales.
- La línea de acción de peso del bloque pasa por el centro del segmento de la superficie de deslizamiento.
- La fuerza normal actúa en el centro de cada segmento de la superficie de deslizamiento.
- La inclinación de las fuerzas que actúan entre los bloques es diferente en cada bloque, siendo al punto extremo de la superficie de deslizamiento igual a cero.

5.1.3 Software Utilizado

El cálculo de estabilidad del talud con los parámetros y criterios definidos para esta investigación requieren de un gran número de iteraciones para lograr converger en un resultado de Factor de Seguridad, por lo que se hace necesario el uso de un programa computacional. En este trabajo se ha empleado el



software Slide 5.0 y la modelación y cálculo de estabilidad del talud se ha realizado teniendo en cuenta lo siguiente:

- Modelación del talud de acuerdo a la geometría, estratigrafía y nivel freático, establecidos en capítulos anteriores.
- Definición de propiedades de los materiales para cada estrato como son: Ángulo de fricción, Cohesión y Densidad. Para el análisis probabilístico se varía los valores de ángulo de fricción y cohesión del estrato de roca sana.
- Se ha considerado que el tipo falla que afectaría al talud sería planar.
- Cálculo del Factor de Seguridad mediante análisis determinístico con los valores establecidos para el modelo del talud.
- Aplicación del método de Equilibrio Límite con criterio de rotura de Morgenstern–Price, para la convergencia del método se utiliza el análisis de 25 dovelas, con 50 iteraciones para cada una.
- El programa computacional realiza el cálculo aleatorio de 2.000 posibles superficies de falla y arroja como resultado final el Factor de Seguridad más bajo con su respectiva superficie de falla.

5.2 Análisis de estabilidad probabilístico

En la Mecánica de Suelos generalmente se trata la estabilidad de taludes como un problema de equilibrio límite y la estabilidad del talud se expresa mediante un factor de seguridad definido como la relación entre las fuerzas o momentos resistentes y las fuerzas o momentos actuantes. Esta definición no considera la variabilidad ni la confiabilidad de los datos requeridos para el análisis y por lo general no tienen en cuenta la incertidumbre asociada con las propiedades del suelo. Considerar un comportamiento homogéneo del suelo, desestima su naturaleza variable debido a los procesos de formación y continuos factores de alteración. En esta investigación se pretende analizar la estabilidad del talud, considerando la incertidumbre de los principales parámetros geotécnicos involucrados en el análisis como son la cohesión y el ángulo de fricción. Los parámetros del suelo son tratados como variables aleatorias con el propósito de modelar la condición incierta del suelo [14] y [15].

Los suelos son de naturaleza variable ya que los procesos que los formaron son una fuente irrefutable de heterogeneidad. Adicionalmente, factores externos como por ejemplo la erosión, excavaciones, voladuras, esfuerzos externos, etc., inciden en la modificación de sus propiedades iniciales [15].



Según Kerguelen (2009) [14], la variabilidad del suelo se la define como la manifestación observable del cambio de sus parámetros físicos. En la estabilidad de taludes es de gran importancia conocer el comportamiento espacial de las propiedades o parámetros que determinan el nivel de seguridad del talud. El análisis determinístico o convencional supone que todas las propiedades del suelo son constantes a lo largo de todo el talud. Sin embargo, existen tres niveles de heterogeneidad en los suelos:

- Heterogeneidad estratigráfica: Resulta de los procesos geológicos y geomorfológicos de gran escala.
- Heterogeneidad litológica: Se aprecia en la localización de pequeñas zonas con distinta litología en una masa de suelo aparentemente homogénea.
- Variabilidad inherente del suelo: Es la variación de las propiedades mecánicas, desde un sitio a otro en un mismo cuerpo de suelo. En este nivel se deben asignar valores cuantitativos a los parámetros mecánicos del suelo.

La variabilidad en los valores característicos del macizo rocoso, como por ejemplo cohesión, fricción y densidad, etc., puede darse por dispersión de los mismos o por errores sistemáticos.

- La dispersión de datos es por un problema de variabilidad espacial y errores aleatorios en los ensayos de laboratorio. Para mitigar el efecto de los errores aleatorios es necesario tomar en cuenta la magnitud de dicha variabilidad e identificar su influencia en los análisis de estabilidad del talud. El error por variabilidad espacial se promedia sobre el volumen del suelo.
- Los errores sistemáticos se relacionan con dos factores: el primero es la cantidad de ensayos realizados y la abundancia o escasez de mediciones al momento de determinar un parámetro. De manera que, la confiabilidad de la media es proporcional al número de datos obtenidos y por tal razón, una población pobre de parámetros a estudiar estadísticamente genera errores. El segundo es por la parcialidad en los ensayos, es decir por las suposiciones y procedimientos seguidos al momento de realizar las pruebas de laboratorio sobre las muestras obtenidas. Los errores sistemáticos son consistentes a lo largo del volumen.



En el capítulo IV de esta investigación se definieron los parámetros geotécnicos característicos del talud, sin embargo, es necesario, conocer el impacto que tienen en el análisis de la estabilidad del talud la variabilidad de dichos parámetros. Esto, debido a que los parámetros fueron definidos por su calidad con el índice RMR, sin considerar la variabilidad espacial que puede existir a lo largo del talud.

En la literatura se encuentra una gran variedad de métodos probabilísticos que pueden ser utilizados en el análisis de estabilidad de taludes que se distinguen entre sí por sus simplificaciones, suposiciones y limitaciones. Los métodos probabilísticos se pueden agrupar en Métodos Aproximados y en Método de Monte Carlo [14] [15] y [11]

Los Métodos Aproximados, permiten la estimación de la media y la desviación estándar del factor de seguridad. Sin embargo, no permiten establecer la forma de la función de densidad de probabilidad del factor de seguridad. Este tipo de métodos deben suponer la forma como se distribuye probabilísticamente el factor de seguridad. Según [14], las estimaciones de probabilidad son sensibles al tipo de distribución escogida para el análisis. Los métodos aproximados más conocidos son:

- FOSM: Primer Orden Segundo Momento
- PEM: Método de la Estimación Puntual
- FORM: Método de Confiabilidad de primer orden

(Nombres definidos por sus siglas en Ingles)

El método de Monte Carlo, no supone el tipo de función de densidad del Factor de Seguridad. Por consiguiente es posible calcular la probabilidad de falla a partir de los resultados arrojados directamente por el método.

Ante la incertidumbre existente, en esta investigación se recurre al análisis probabilístico con variación de los parámetros geotécnicos dentro de rangos que ya fueron definidos en el capítulo IV.

Con la finalidad de identificar como influye estadísticamente la variabilidad de la cohesión y la fricción en el cálculo del factor de seguridad de la estabilidad del talud, se hizo el análisis estadístico de dos escenarios definidos de acuerdo a sus valores muestrales de los parámetros geotécnicos, primero se realizó el cálculo del factor de seguridad del talud para un conjunto de datos generados



aleatoriamente que obedecen a una distribución uniforme en el caso del ángulo de fricción y distribución normal para la cohesión y el segundo escenario con el conjunto de datos aleatorios que corresponden a la distribución Normal para cohesión y ángulo de fricción.

Los parámetros que se van a considerar como variables para esta investigación, son los que influyen en la resistencia del talud: cohesión y ángulo de fricción del estrato de roca de buena calidad, identificado en el perfil representativo del talud B-B' como horizonte 4, en el Gráfico No. 4.3, es en dicho estrato donde los inclinómetros han detectado el plano de falla.

5.2.1 Generación de valores aleatorios

Para todos los análisis y simulaciones, existe la necesidad de generar valores de variables aleatorias que pertenezcan a una cierta distribución de probabilidad, tal como se comportan en el mundo real. Una manera de generar estas observaciones simuladas es mediante los números aleatorios. El generar los números al azar con el método adecuado es de gran importancia ya que posteriormente el conjunto de datos deberán cumplir con las características del conjunto y validarán el proceso de simulacro generado [15].

En el capítulo IV, se indicó en el cuadro No. 4.3 el rango de valores de cohesión y ángulo de fricción para el estrato de roca sana, o llamado también horizonte 4. Para el primer escenario se generaron valores aleatorios para la cohesión en software Excel 2010 entre 294 – 392 Kpa, y para la fricción se tomaron todos los valores enteros posibles dentro del rango, es decir los valores enteros entre 35° a 45°. Para el segundo escenario se utilizó en software Excel 2010, para generar valores de cohesión y ángulo de fricción con distribución normal controlando que la desviación estándar de los valores obtenidos cubran el 99,7% de la curva probabilidad. Se generaron 11 valores aleatorios para cada parámetro geotécnico dentro de los rangos determinados debido a que es la cantidad de valores enteros que puede asumir el ángulo de fricción para el rango de datos planteado, así se tendría una muestra que representa al conjunto.

5.2.2 Escenario 1: Cálculo de factor de seguridad con valores de ángulo de fricción con distribución uniforme y cohesión con distribución normal

La distribución uniforme con variable discreta asume un número finito de valores con la misma probabilidad de ocurrencia, mientras que en la distribución normal



la variable continua puede asumir un número infinito de valores que obedecen a una función de densidad o probabilidad de ocurrencia dentro de un rango.

Para la determinación de los valores de probabilidad por debajo de la curva de distribución normal, según Murray y Spiegel (1980) [17], se establece que en función de los factores de seguridad obtenidos, se puede calcular la probabilidad de que se dé un resultado con el cálculo mediante tablas para la distribución normal, dicha tabla se muestra en el anexo No. 09. La curva definida en distribución normal, se la conoce como campana de Gauss y se la define por la siguiente ecuación [14]:

$$f(x) = \frac{e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (5.7)$$

En donde:

$f(x)$ = Curva de Densidad en función del factor de seguridad

x = Factor de Seguridad, que se convierte en una variable aleatoria para la cual se desea buscar su probabilidad, definida como el área bajo la curva $f(x)$

μ = Media de la Muestra

e = 2.7182 ...

π = 3.141516..

σ = Desviación estandar

El área bajo la curva definida por $f(x)$, representa la probabilidad de que se dé x , dentro de rangos especificados.

Para realizar el cálculo de probabilidad hay que transformar la variable " x " que sigue una distribución $N(\mu, \sigma)$, en otra variable z que siga una distribución $N(0,1)$, para posteriormente utilizar la Tabla de Probabilidades de Distribución Normal.

Entonces el valor de z se define como:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5.8)$$

En el escenario 1 se generaron valores con distribución normal de variable continua dentro del rango 294 a 392 Kpa para la cohesión. Mientras que para el ángulo de fricción se generaron valores uniformes con variable discreta, empleando todos los valores enteros dentro del rango 35° a 45°. Los valores utilizados para las simulaciones se presentan en el cuadro No. 5.2.



Selección aleatoria de parámetros geotécnicos			
Estrato roca II			
Nombre de muestra	Cohesión (KPa) Rango 294 - 392	Nombre de muestra	Fricción (°) Rango 35 – 45
A	335	1	42
B	345	2	36
C	321	3	38
D	364	4	40
E	315	5	45
F	340	6	41
G	365	7	39
H	318	8	37
I	338	9	43
J	301	10	35
K	304	11	44

Cuadro 5.2: Datos de cohesión y ángulo de fricción generados aleatoriamente en Excel 2010, para el rango determinado en base a la calidad de la roca.

Después de realizar una adecuada agrupación desde el punto de vista estadístico, en los cuadros 5.3 y 5.4 se presenta la distribución de frecuencia de los datos a utilizar para el cálculo del factor de seguridad. Mientras que en los gráficos 5.4 y 5.5 se puede apreciar la distribución de frecuencia dentro del rango de los parámetros geotécnicos asumidos.

<u>Distribución de datos de cohesión</u>					
Mínimo = 294				KPa	
Máximo = 392				KPa	
Número de datos de la muestra = (n) = 11					
Rango de variación = 98					
No. Intervalos = $1 + 3,33 \log (n) = 5$					
Amplitud = 20					
Intervalo	Min.	Max.	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
1	294	314	2	18.18%	18.18%
2	314	334	3	27.27%	45.46%
3	334	354	4	36.36%	81.82%
4	354	374	2	18.18%	100.00%



5	374	394	0	0.00%	100.00%
TOTAL DE DATOS			11	100%	

Cuadro 5.3: Distribución de frecuencias de datos aleatorios para Cohesión del estrato de roca del talud sobre el vertedero

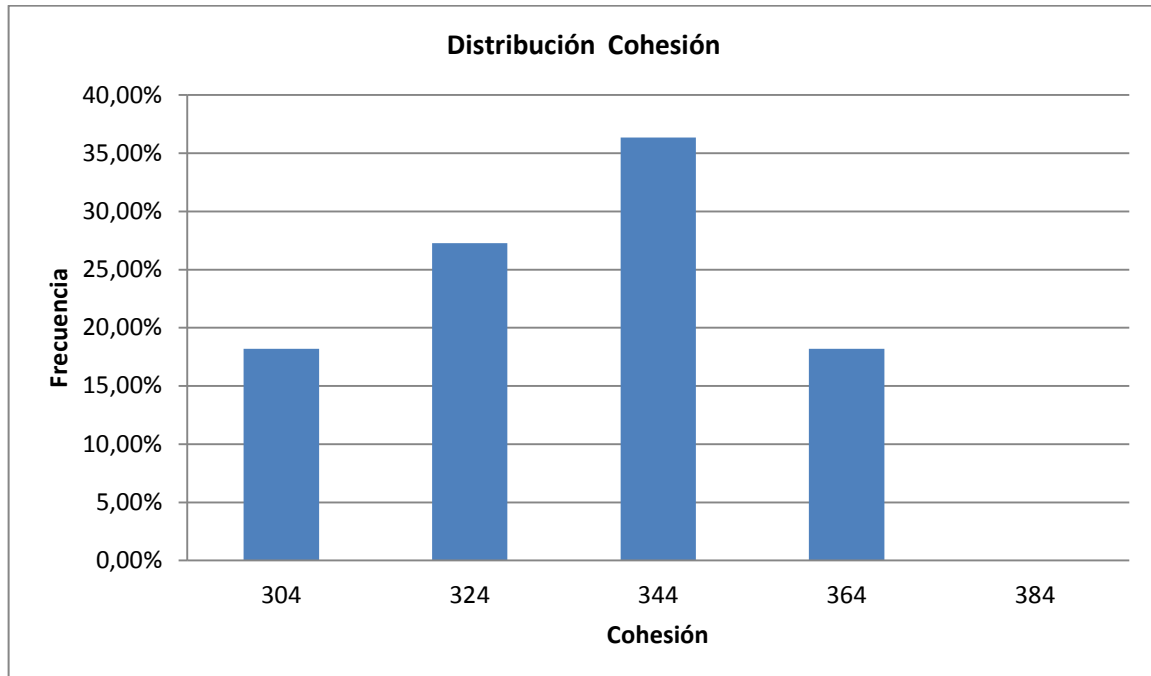


Gráfico 5.4: Distribución de frecuencia de valores asumidos de cohesión del estrato de roca para análisis probabilístico. Que tiende a obedecer a distribución normal

Distribución uniforme fricción					
Mínimo = 35°					
Máximo = 45°					
Número de datos de la muestra = (n) = 11					
Rango de variación = 10					
No. Intervalos = $1 + 3,33 \log(n)$ = 5					
Amplitud = 2					
Intervalo	Min	Max	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
1	35	37	2	18.182%	18.18%
2	37	39	2	18.182%	36.36%
3	39	41	2	18.182%	54.55%
4	41	43	2	18.182%	72.73%
5	43	45	3	27.273%	100.00%



Total de datos	11	100%
----------------	----	------

Cuadro 5.4: Distribución de frecuencias de datos aleatorios para Fricción del estrato de roca del talud sobre el vertedero

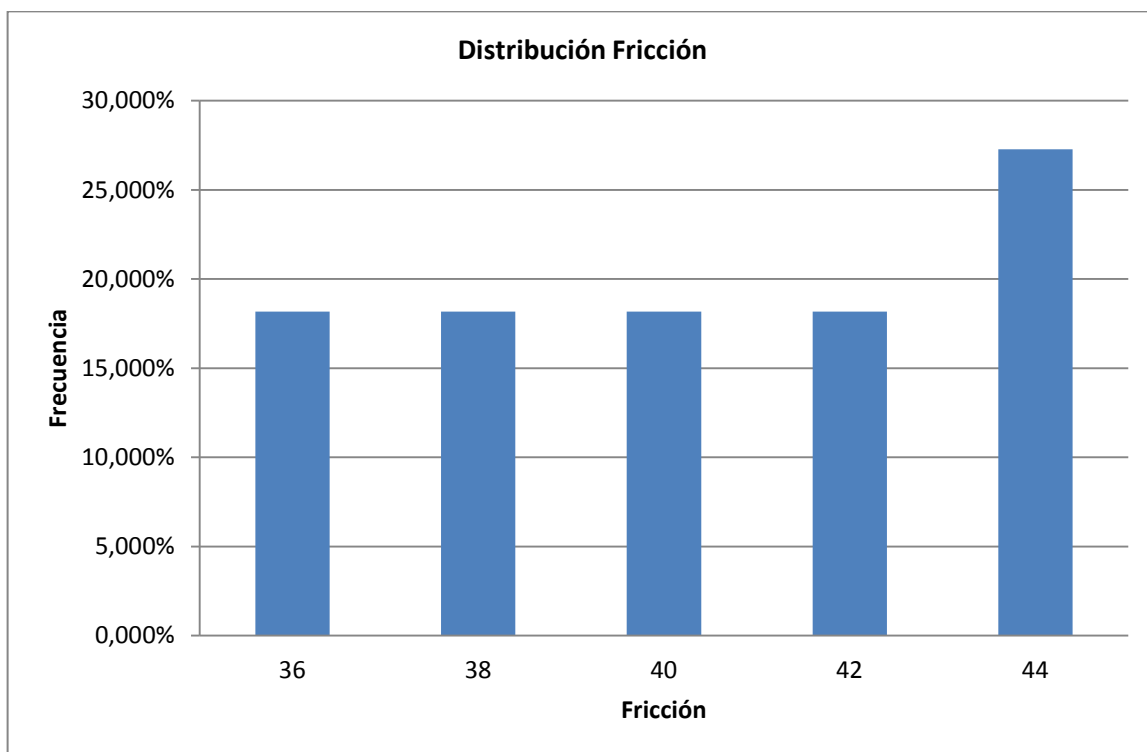


Gráfico 5.5: Distribución de Frecuencia de valores asumidos de fricción del estrato de roca para análisis probabilístico. Obedece a distribución Uniforme

Para el análisis probabilístico de estabilidad del talud, se realizaron las 121 combinaciones posibles entre los valores de los parámetros generados aleatoriamente, obteniendo para cada ensayo un valor del factor de seguridad. Dicho factor se calculó a través del programa computacional Slide 5.0. Los parámetros geotécnicos que variaron son los de cohesión y ángulo de fricción interna del estrato en el que se da la rotura, que es la roca de buena calidad del horizonte 4 definido en el capítulo IV representado en el gráfico No. 4.3. Los resultados obtenidos en cada combinación se presentan en el cuadro No. 5.5.



Combinaciones de parámetros geotécnicos utilizados, con distribución uniforme, para análisis probabilístico de estabilidad del talud			Factor de seguridad obtenido (F S)
Combinación	Estrato roca		
	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	
	Rango 294 – 392	Rango 35 - 45	
A:1	335	42	1.611
A:2	335	36	1.387
A:3	335	38	1.455
A:4	335	40	1.536
A:5	335	45	1.737
A:6	335	41	1.573
A:7	335	39	1.497
A:8	335	37	1.420
A:9	335	43	1.651
A:10	335	35	1.354
A:11	335	44	1.694
B:1	345	42	1.625
B:2	345	36	1.401
B:3	345	38	1.469
B:4	345	40	1.550
B:5	345	45	1.751
B:6	345	41	1.587
B:7	345	39	1.504
B:8	345	37	1.435
B:9	345	43	1.666
B:10	345	35	1.369
B:11	345	44	1.708
C:1	321	42	1.592
C:2	321	36	1.367
C:3	321	38	1.442
C:4	321	40	1.516
C:5	321	45	1.717
C:6	321	41	1.554
C:7	321	39	1.478



C:8	321	37	1.401
C:9	321	43	1.632
C:10	321	35	1.334
C:11	321	44	1.674
D:1	364	42	1.653
D:2	364	36	1.430
D:3	364	38	1.498
D:4	364	40	1.577
D:5	364	45	1.778
D:6	364	41	1.615
D:7	364	39	1.534
D:8	364	37	1.464
D:9	364	43	1.693
D:10	364	35	1.389
D:11	364	44	1.735
E:1	315	42	1.583
E:2	315	36	1.358
E:3	315	38	1.434
E:4	315	40	1.507
E:5	315	45	1.708
E:6	315	41	1.545
E:7	315	39	1.469
E:8	315	37	1.392
E:9	315	43	1.623
E:10	315	35	1.325
E:11	315	44	1.665
F:1	340	42	1.618
F:2	340	36	1.394
F:3	340	38	1.462
F:4	340	40	1.543
F:5	340	45	1.744
F:6	340	41	1.580
F:7	340	39	1.497
F:8	340	37	1.427
F:9	340	43	1.659
F:10	340	35	1.361
F:11	340	44	1.701
G:1	365	42	1.654
G:2	365	36	1.424
G:3	365	38	1.500
G:4	365	40	1.578
G:5	365	45	1.779
G:6	365	41	1.616



G:7	365	39	1.535
G:8	365	37	1.465
G:9	365	43	1.695
G:10	365	35	1.390
G:11	365	44	1.736
H:1	318	42	1.587
H:2	318	36	1.362
H:3	318	38	1.438
H:4	318	40	1.511
H:5	318	45	1.712
H:6	318	41	1.549
H:7	318	39	1.474
H:8	318	37	1.396
H:9	318	43	1.628
H:10	318	35	1.330
H:11	318	44	1.669
I:1	338	42	1.615
I:2	338	36	1.391
I:3	338	38	1.459
I:4	338	40	1.539
I:5	338	45	1.742
I:6	338	41	1.577
I:7	338	39	1.494
I:8	338	37	1.424
I:9	338	43	1.656
I:10	338	35	1.359
I:11	338	44	1.698
J:1	301	42	1.563
J:2	301	36	1.338
J:3	301	38	1.414
J:4	301	40	1.488
J:5	301	45	1.688
J:6	301	41	1.525
J:7	301	39	1.450
J:8	301	37	1.380
J:9	301	43	1.603
J:10	301	35	1.313
J:11	301	44	1.645
K:1	304	42	1.567
K:2	304	36	1.343
K:3	304	38	1.419
K:4	304	40	1.493
K:5	304	45	1.692



K:6	304	41	1.529
K:7	304	39	1.454
K:8	304	37	1.384
K:9	304	43	1.607
K:10	304	35	1.309
K:11	304	44	1.649
No. de Resultados Obtenidos = 121			
(Promedio) Media Aritmética = 1.533			
Valor de F.S. Máximo Obtenido = 1.779			
Valor F. S. Mínimo Obtenido = 1.309			

Cuadro 5.5: Resultados obtenidos para Factor de Seguridad variando parámetros geotécnicos con distribución uniforme del ángulo de fricción.

Al analizar el cuadro 5.5 se observa que mientras mayores son los valores de cohesión y fricción mayor es el factor de seguridad alcanzado.

Para los 121 resultados obtenidos del Factor de Seguridad, se generó la tabla de frecuencias, que se presenta en el cuadro No. 5.6, y con estos datos se realizó el gráfico No. 5.6, en el que se puede observar los valores obtenidos para el Factor de Seguridad responden a una distribución que tiende a ser uniforme.

Tabla de frecuencias del factor de seguridad					
Mínimo				1.309	
Máximo				1.779	
Número de datos de la Muestra = n =				121	
Rango de variación =				0.47	
No. intervalos = $1 + 3,33 \log (n)$ =				8	
Amplitud				0.05875	
Intervalo	Min	Max	Frecuencia Acumulada	Frecuencia	Frecuencia Relativa
1	1.309	1.368	13	13	10.744%
2	1.368	1.427	30	17	14.050%
3	1.427	1.485	47	17	14.050%
4	1.485	1.544	65	18	14.876%
5	1.544	1.603	80	15	12.397%
6	1.603	1.662	98	18	14.876%
7	1.662	1.720	113	15	12.397%
8	1.720	1.779	121	8	6.612%
Total:				121	100%

Cuadro No. 5.6: Frecuencia de resultados para Factor de Seguridad para estabilidad del talud sobre el vertedero de la presa de la Central Mazar. Las combinaciones obedecen a la distribución Uniforme.

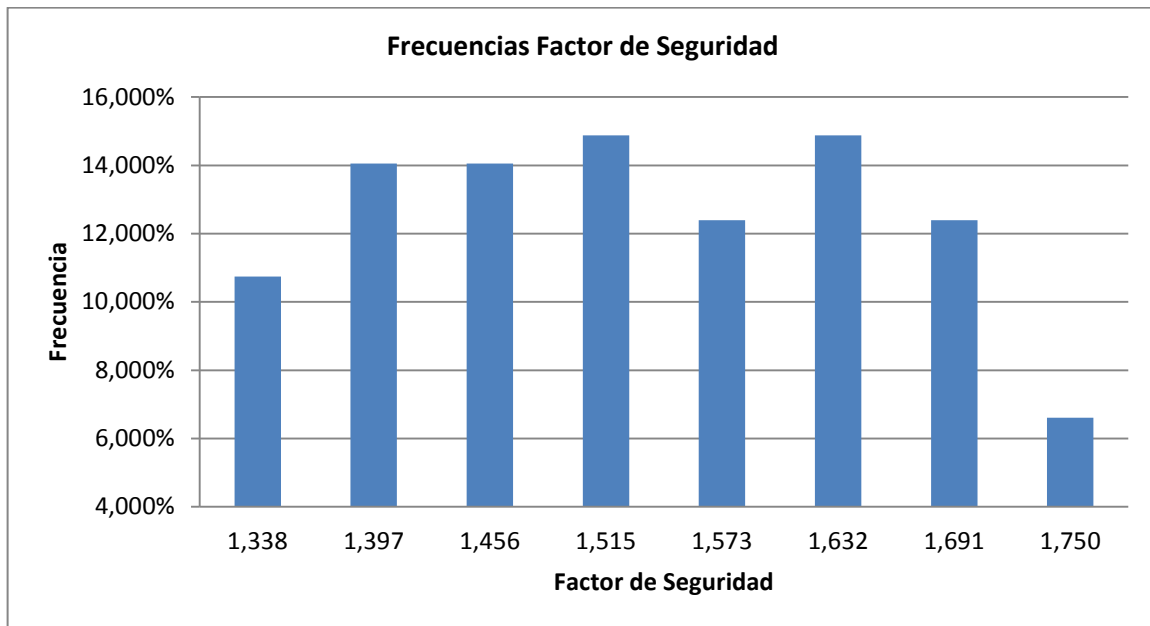


Grafico No. 5.6: Histograma de frecuencia vs. valor del Factor de Seguridad. Valores calculados con distribución uniforme de valores de fricción y normales de cohesión.

En los Gráficos No. 5.7, 5.8 y 5.9, se muestran las proyecciones de las superficies de falla con sus respectivos Factores de Seguridad para la combinaciones C:4, J:6 y D:7, se eligen estos tres resultados como representación de la muestra, ya que son los que tienen los Factores de Seguridad más cercanos a la media estadística, los datos con los que se realizaron estas proyecciones se muestran en el cuadro No. 5.7

Combinaciones de parámetros geotécnicos utilizados, con distribución uniforme, para análisis probabilístico de estabilidad del talud			Factor de seguridad obtenido (F S)
Combinación	Estrato roca		
	Cohesión (KPa)	Fricción (º)	
	Rango 294 – 392	Rango 35 - 45	
C:4	321	40	1.516
D:7	364	39	1.534
J:6	301	41	1.525

Cuadro 5.7: Resultados cercanos a la media estadística obtenidos para Factor de Seguridad variando parámetros de ángulo de fricción con distribución uniforme.

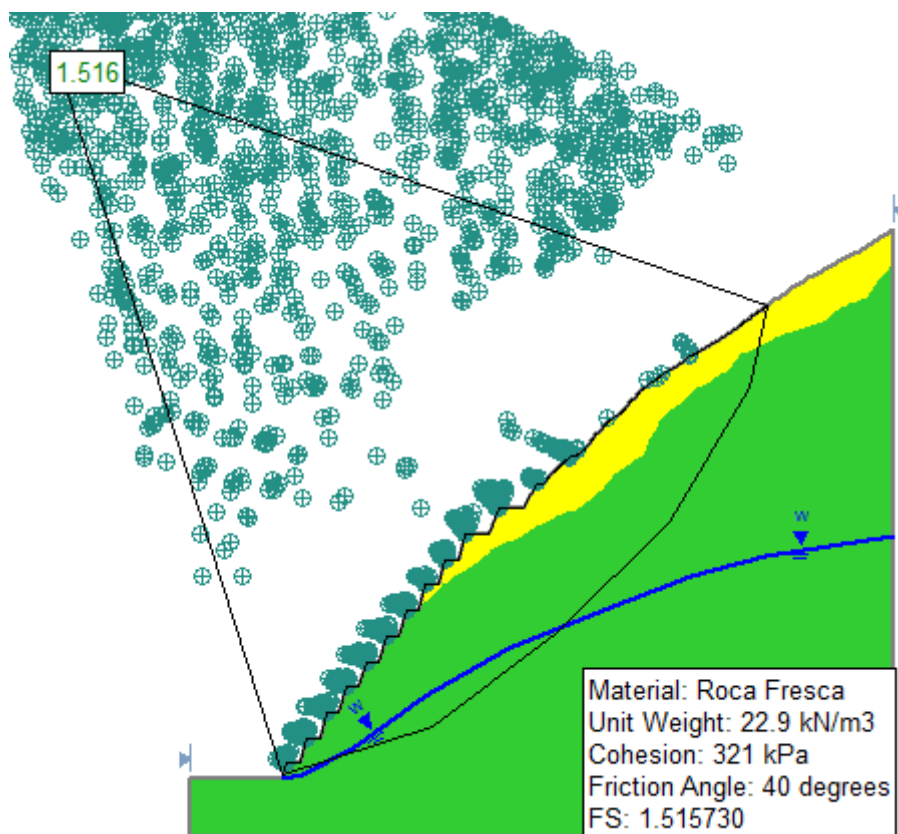


Grafico No. 5.7: Superficie de Falla calcula en Slide 5.0, para la combinación de parametros geotécnicos C:4.

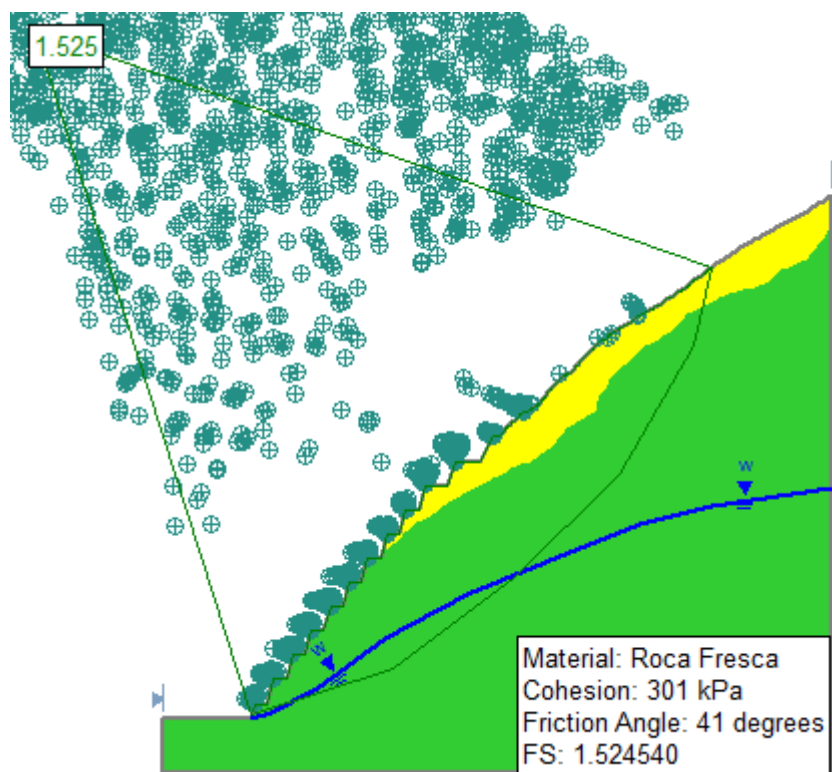


Grafico No. 5.8: Superficie de Falla calcula en Slide 5.0, para la combinación de parametros geotécnicos J:6

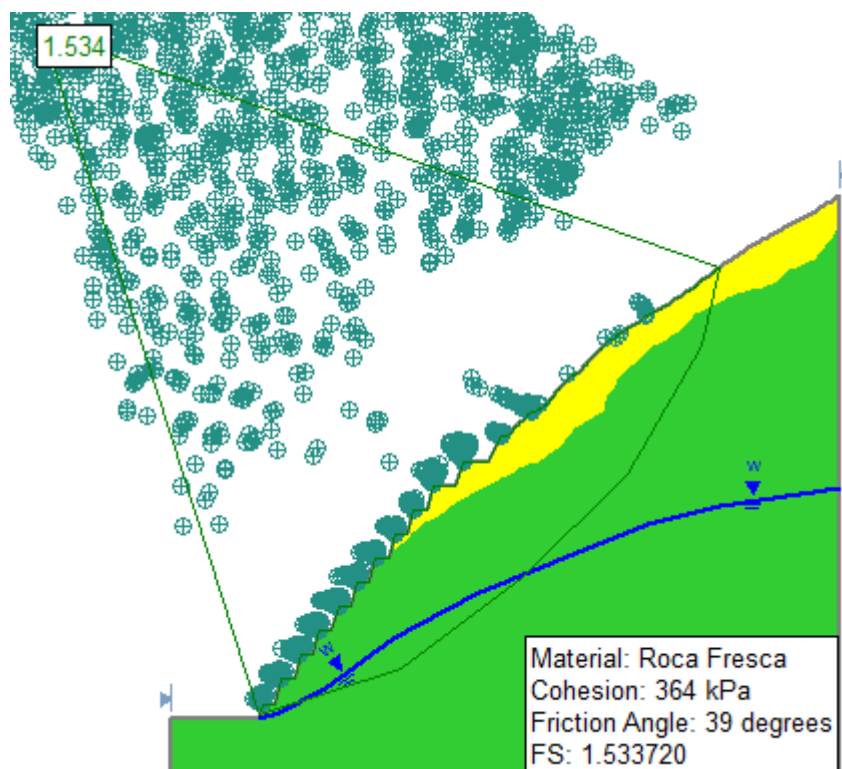


Gráfico No. 5.9 : Superficie de Falla calcula en Slide 5.0, para la combinación de parametros geotécnicos D:7

5.2.3 Escenario 2: Cálculo de Factor de seguridad con valores de ángulo de fricción y cohesión con distribución normal

De acuerdo al U.S. Army Corps of Engineers [14], se recomienda realizar el análisis probabilístico, variando los parámetros geotécnicos de cohesión y ángulo de fricción con distribución normal. Considerando lo recomendado, se generaron valores aleatorios con programa computacional Microsoft Excel 2010.

El software utiliza subrutinas para la generación automática aleatoria de valores y puede predeterminar la desviación estándar de la muestra.

Para mantener el mismo tamaño muestral que en el primer se generaron 11 valores para cada parámetro geotécnico considerado como variable.

Al considerar una distribución normal de los datos, es posible conocer a través de la desviación estándar, que la dispersión de los datos analizados en torno a la media de la muestra estén dentro de un porcentaje de probabilidad (Murray y Spiegel, 1980) [17].

La distribución de la probabilidad en torno a la media (signada con μ), conociendo la desviación estandar (signada con σ), permite establecer intervalos de confianza, como se explica a continuación:

- En el intervalo $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ se encuentra comprendida, aproximadamente, el 68,3% de la distribución.
- En el intervalo $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ se encuentra, aproximadamente, el 95,5% de la distribución.
- En el intervalo $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ se encuentra comprendida, aproximadamente, el 99,7% de la distribución.
- Para mejor comprensión de lo expresado se presenta el gráfico No. 5.10, en el que se muestra la relación que existe entre la desviación estandar y el intervalo de confianza de la muestra.

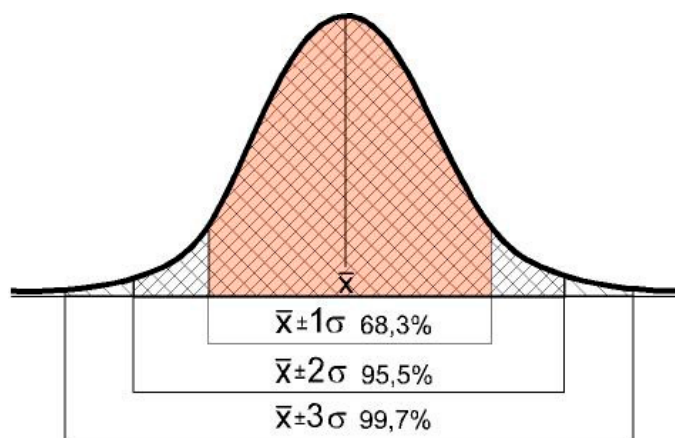


Gráfico No. 5.10: Distribución de Probabilidad en torno a la media y desviación estandar, con coeficientes de confianza 1, 2 y 3. Adaptado de [17].

A este valor que multiplica a σ se lo conoce con el nombre de coeficiente de confianza (z_c). En el cuadro No. 5.8, se muestra los coeficientes de confianza z_c que corresponden a diferentes niveles de confianza utilizados en la práctica, para distribuciones normales.

Nivel de Confianza	99.73%	99%	98%	96%	95.45%	95%	90%	80%	68.27%	50%
z_c	3.00	2.58	2.33	2.05	2.00	1.96	1.645	1.28	1.00	0.6745

Cuadro No. 5.8: Niveles de confianza [17]

Entonces, con coeficiente de confianza mayor a 3, prácticamente la totalidad de la distribución se encuentra considerada en el análisis. Bajo este criterio, para los valores de cohesión se utilizó el valor de desviación estandar de 20 y para el ángulo de fricción se generaron valores aleatorios con desviación estandar de 2,



lo que permitió generar valores con distribución normal dentro de los rangos geotécnicos establecidos. Además, la desviación estandar considerada garantiza que la dispersión de la muestra cubra más del 99,7% de probabilidad de la muestra [17], es decir que el valor del coeficiente de confianza es mayor que tres ($z_c \geq 3$).

Para el cálculo del valor mínimo de la desviación estandar de la cohesión, se consideró lo siguiente:

- Se desea cubrir un rango mayor a 99,7% en la dispersión de las muestras.
- Media muestral es $\mu = 343$ KPa
- Valor Máximo del Rango es $x_{max} = 392$ KPa
- Para cubrir más del 99,7% de dispersión de probabilidad, es necesario que:

$$z_c = \frac{x_{max} - \mu}{\sigma} \geq 3$$

Entonces,

$$\frac{392 - 342}{\sigma} \geq 3$$

- De ahí que el valor de la desviación estandar mínimo debe ser ($\sigma \geq 49/3$) $\sigma \geq 16,33$.
- Para el caso de la cohesión se asumió que $\sigma = 20$ para la generación de valores aleatorios en el programa computacional Microsoft Excel 2010.
- Posterior a la generación de valores aleatorios se calculó el valor de desviación estandar de la muestra aleatoria para la cohesión $\sigma_c = 17,07$ comprobando que se cubre mas del 99.7% de probabilidad de la muestra.

Para el cálculo del valor mínimo para la desviación estandar para la fricción, se procedió con el mismo criterio:

- Se desea cubrir un rango mayor a 99,7%.
- Media muestral es $\mu = 40^\circ$
- Valor Máximo del Rango es $x_{max} = 45^\circ$
- Para cubrir más del 99,7% de dispersión de probabilidad, es necesario que:

$$z_c = \frac{x_{max} - \mu}{\sigma} \geq 3$$

Entonces,

$$\frac{45 - 40}{\sigma} \geq 3$$

- Entonces el valor de la desviación estandar mínimo debe ser ($\sigma \geq 5/3$) $\sigma \geq 1.66$.
- Para el caso de la fricción se asumió $\sigma_f = 2$ para la generación de valores aleatorios en el programa computacional Microsoft Excel 2010.
- Posterior a la generación de valores aleatorios se calculó el valor de desviación estandar de la muestra aleatoria para la fricción $\sigma_f = 1.678$ comprobando que se cubre el 99.7 % de probabilidad de la muestra.

En el cuadro 5.9 se muestra los valores aleatorios generados para las 121 combinaciones que se van a realizar, en el análisis probabilístico de la estabilidad del talud, con sus respectivas desviaciones muestrales.

Selección aleatoria de parámetros geotécnicos			
Distribución Normal			
Estrato Roca II			
Nombre de la muestra	Cohesión (kPa)	Nombre de la muestra	Fricción
	Rango 294 – 392		Rango 35 – 45
	Media = 343 Desv. Estándar = 20		Media = 40 Desv. Estándar = 2
L	344	12	36.758
M	331	13	39.740
N	336	14	43.101
O	307	15	39.089
P	359	16	39.556
Q	362	17	39.839
R	350	18	41.074
S	337	19	38.323
T	323	20	39.177
U	360	21	41.630
V	332	22	37.668
Desviación Estándar calculada = 17.07		Desviación Estándar calculada = 1.678	

Cuadro No. 5.9: Datos de cohesión y ángulo de fricción generados aleatoriamente en Excel 2010, para el rango determinado en base a la calidad de la roca.



Al igual que con los datos obtenidos en el escenario 1, se agruparon los datos obtenidos con distribución normal. En los cuadros 5.10 y 5.11 se presenta la distribución de frecuencia de los datos a utilizar para el análisis probabilístico con distribución normal de la cohesión y fricción. Mientras que, en los gráficos 5.11 y 5.12 se puede apreciar la distribución de frecuencia dentro del rango de los parámetros geotécnicos asumidos, donde claramente se nota el comportamiento normal de la distribución.

Distribución Normal Cohesión					
Mínimo =		294 KPa			
Máximo =		392 KPa			
Número de datos de la Muestra = (n) =		11			
Rango de variación =		98			
No. intervalos = $1 + 3,33 \log (n)$ =		5			
Amplitud =		20			
Intervalo	Min.	Max.	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada
1	294	314	1	9.09%	9.09%
2	314	334	3	27.27%	36.36%
3	334	354	4	36.36%	72.73%
4	354	374	3	27.27%	100.00%
5	374	394	0	0.00%	100.00%
Total :			11	100%	

Cuadro No. 5.10: Distribución normal de frecuencias de datos aleatorios para cohesión del estrato de roca del talud sobre el vertedero

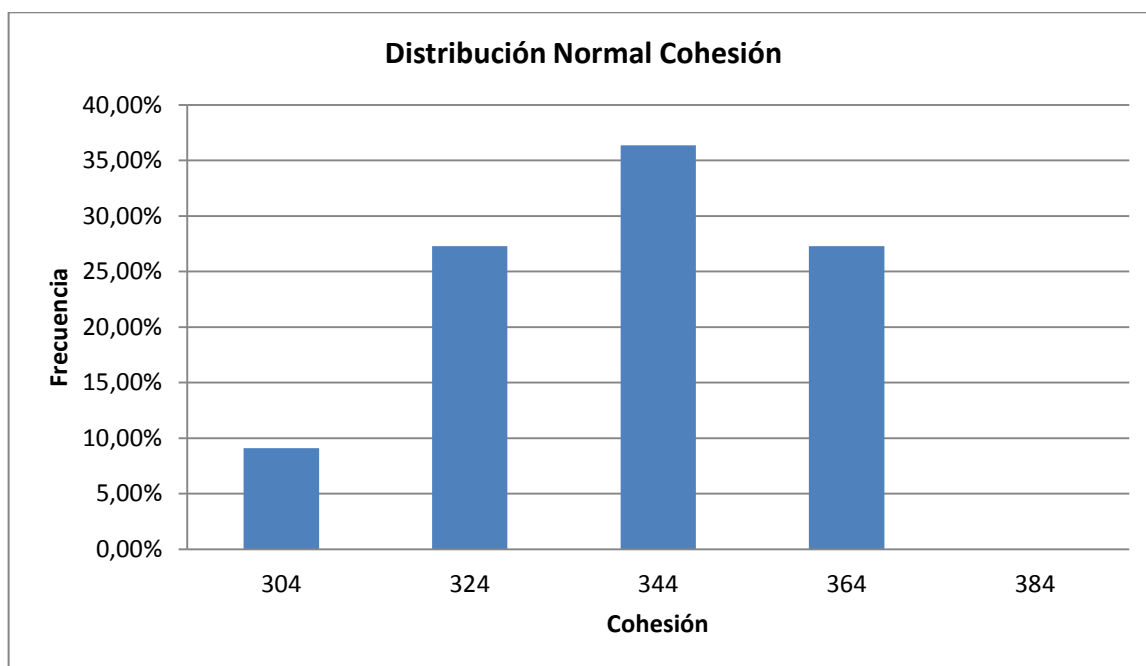


Gráfico 5.11: Distribución de frecuencia de valores asumidos de cohesión del estrato de roca para análisis probabilístico.



Distribución Normal Fricción					
Mínimo			35 °		
Máximo			45 °		
Número de datos de la muestra = (n) =			11		
Rango de variación =			10		
No. intervalos = $1 + 3,33 \log (n) =$			5		
Amplitud =			2		
Intervalo	Min.	Max.	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada
1	35	37	1	9.091%	9.09%
2	37	39	2	18.182%	27.27%
3	39	41	5	45.455%	72.73%
4	41	43	2	18.182%	90.91%
5	43	45	1	9.091%	100.00%
Total:			11	100%	

Cuadro No. 5.11: Distribución normal de frecuencias de datos aleatorios para el ángulo de fricción del estrato de roca del talud sobre el vertedero

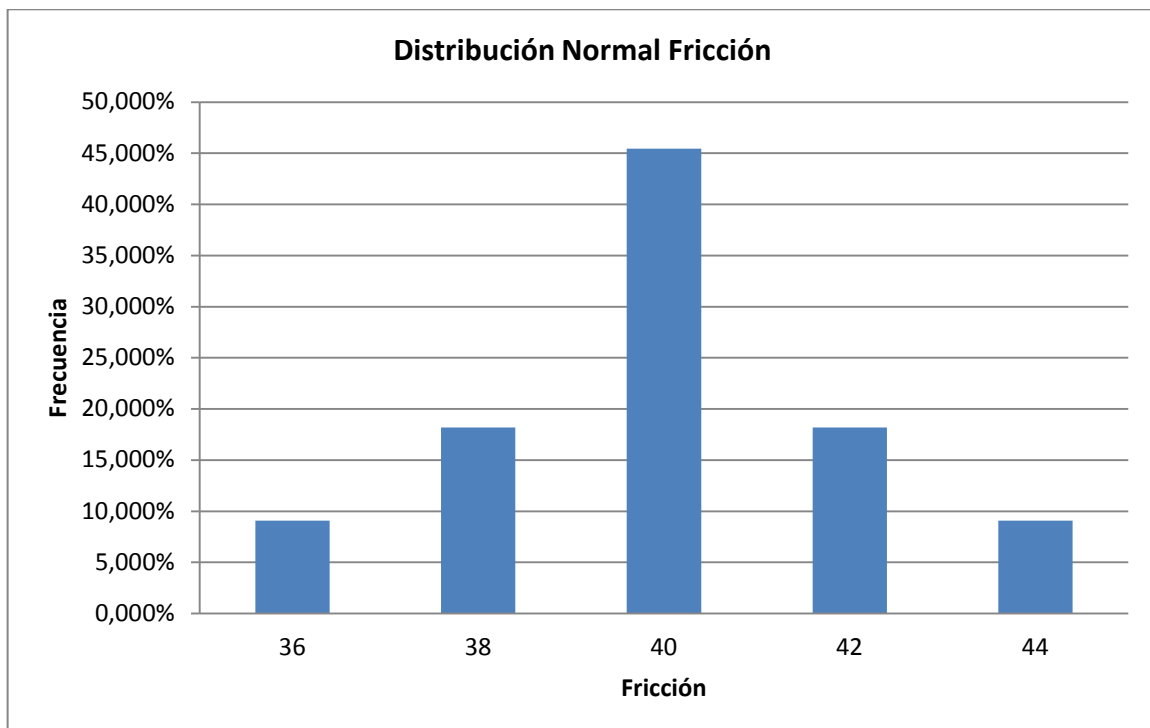


Gráfico 5.12: Distribución de Frecuencia de valores asumidos de Fricción del estrato de roca para análisis probabilístico.



Con estos datos se realizaron los 121 análisis de combinaciones posibles para el cálculo de Factor de Seguridad de talud, obteniéndose los resultados que se muestran en el cuadro No. 5.12

Parámetros geotécnicos utilizados para análisis probabilístico de estabilidad del talud, considerando distribución Normal			Factor de seguridad obtenido (F S)
Combinación	Estrato roca II		
	Cohesión (kpa) Rango 294 – 392	Fricción (°) Rango 35 – 45	
L:12	344	36.758	1.425
L:13	344	37.668	1.456
L:14	344	38.323	1.479
L:15	344	39.089	1.506
L:16	344	39.177	1.518
L:17	344	39.556	1.532
L:18	344	39.740	1.539
L:19	344	39.839	1.543
L:20	344	41.074	1.589
L:21	344	41.630	1.609
L:22	344	43.101	1.669
M:12	331	36.758	1.406
M:13	331	37.668	1.438
M:14	331	38.323	1.460
M:15	331	39.089	1.495
M:16	331	39.177	1.498
M:17	331	39.556	1.514
M:18	331	39.740	1.521
M:19	331	39.839	1.524
M:20	331	41.074	1.570
M:21	331	41.630	1.591
M:22	331	43.101	1.651
N:12	336	36.758	1.413
N:13	336	37.668	1.445
N:14	336	38.323	1.467
N:15	336	39.089	1.502
N:16	336	39.177	1.505
N:17	336	39.556	1.521
N:18	336	39.740	1.528
N:19	336	39.839	1.531
N:20	336	41.074	1.577



N:21	336	41.630	1.598
N:22	336	43.101	1.657
O:12	307	36.758	1.372
O:13	307	37.668	1.411
O:14	307	38.323	1.434
O:15	307	39.089	1.462
O:16	307	39.177	1.465
O:17	307	39.556	1.478
O:18	307	39.740	1.486
O:19	307	39.839	1.490
O:20	307	41.074	1.536
O:21	307	41.630	1.557
O:22	307	43.101	1.616
P:12	359	36.758	1.448
P:13	359	37.668	1.477
P:14	359	38.323	1.502
P:15	359	39.089	1.536
P:16	359	39.177	1.540
P:17	359	39.556	1.554
P:18	359	39.740	1.560
P:19	359	39.839	1.564
P:20	359	41.074	1.611
P:21	359	41.630	1.631
P:22	359	43.101	1.690
Q:12	362	36.758	1.453
Q:13	362	37.668	1.482
Q:14	362	38.323	1.507
Q:15	362	39.089	1.534
Q:16	362	39.177	1.537
Q:17	362	39.556	1.558
Q:18	362	39.740	1.565
Q:19	362	39.839	1.568
Q:20	362	41.074	1.615
Q:21	362	41.630	1.635
Q:22	362	43.101	1.694
R:12	350	36.758	1.434
R:13	350	37.668	1.464
R:14	350	38.323	1.488
R:15	350	39.089	1.524
R:16	350	39.177	1.527
R:17	350	39.556	1.541
R:18	350	39.740	1.547
R:19	350	39.839	1.551



R:20	350	41.074	1.597
R:21	350	41.630	1.618
R:22	350	43.101	1.677
S:12	337	36.758	1.415
S:13	337	37.668	1.446
S:14	337	38.323	1.469
S:15	337	39.089	1.496
S:16	337	39.177	1.506
S:17	337	39.556	1.523
S:18	337	39.740	1.529
S:19	337	39.839	1.533
S:20	337	41.074	1.579
S:21	337	41.630	1.599
S:22	337	43.101	1.658
T:12	323	36.758	1.395
T:13	323	37.668	1.426
T:14	323	38.323	1.456
T:15	323	39.089	1.484
T:16	323	39.177	1.487
T:17	323	39.556	1.502
T:18	323	39.740	1.509
T:19	323	39.839	1.513
T:20	323	41.074	1.559
T:21	323	41.630	1.580
T:22	323	43.101	1.639
U:112	360	36.758	1.450
U:13	360	37.668	1.481
U:14	360	38.323	1.504
U:15	360	39.089	1.538
U:16	360	39.177	1.541
U:17	360	39.556	1.555
U:18	360	39.740	1.562
U:19	360	39.839	1.565
U:20	360	41.074	1.612
U:21	360	41.630	1.633
U:22	360	43.101	1.692
V:12	332	36.758	1.408
V:13	332	37.668	1.439
V:14	332	38.323	1.462
V:15	332	39.089	1.496
V:16	332	39.177	1.499
V:17	332	39.556	1.515
V:18	332	39.740	1.522



V:19	332	39.839	1.526
V:20	332	41.074	1.611
V:21	332	41.630	1.592
V:22	332	43.101	1.652
No. de Resultados Obtenidos =			121
(Promedio) Media Aritmética =			1.529
Desviación Estándar de la Muestra =			0.07073
Valor de F.S. Máximo Obtenido =			1.694
Valor F. S. Mínimo Obtenido =			1.372

Cuadro 5.12: Resultados obtenidos para Factor de Seguridad variando parámetros geotécnicos con distribución normal

Para los 121 resultados obtenidos del Factor de Seguridad, se generó la tabla de frecuencias, que se presenta en el cuadro No. 5.13, y con estos datos se realizó el gráfico No. 5.13, en el que se puede observar claramente que los valores obtenidos para el Factor de Seguridad obedecen a una distribución Normal.

Distribución de Factor de Seguridad					
Mínimo =			1.372		
Máximo =			1.694		
Número de datos de la muestra = (n) =			121		
Rango de variación =			0.322		
No. intervalos = $1 + 3,33 \log (n)$ =			8		
Amplitud			0.04025		
Intervalo	Min.	Max.	Frecuencia Acumulada	Frecuencia	Frecuencia Relativa
1	1.372	1.412	5	5	4.167%
2	1.412	1.453	17	12	10.000%
3	1.453	1.493	37	20	16.667%
4	1.493	1.533	67	30	25.000%
5	1.533	1.573	92	25	20.833%
6	1.573	1.614	105	13	10.833%
7	1.614	1.654	114	9	7.500%
8	1.654	1.694	120	6	5.000%
Total:				120	100%

Cuadro No. 5.13: Frecuencia de resultados del Factor de Seguridad del talud sobre el vertedero de la presa de la Central Mazar. Las combinaciones obedecen a la distribución normal.

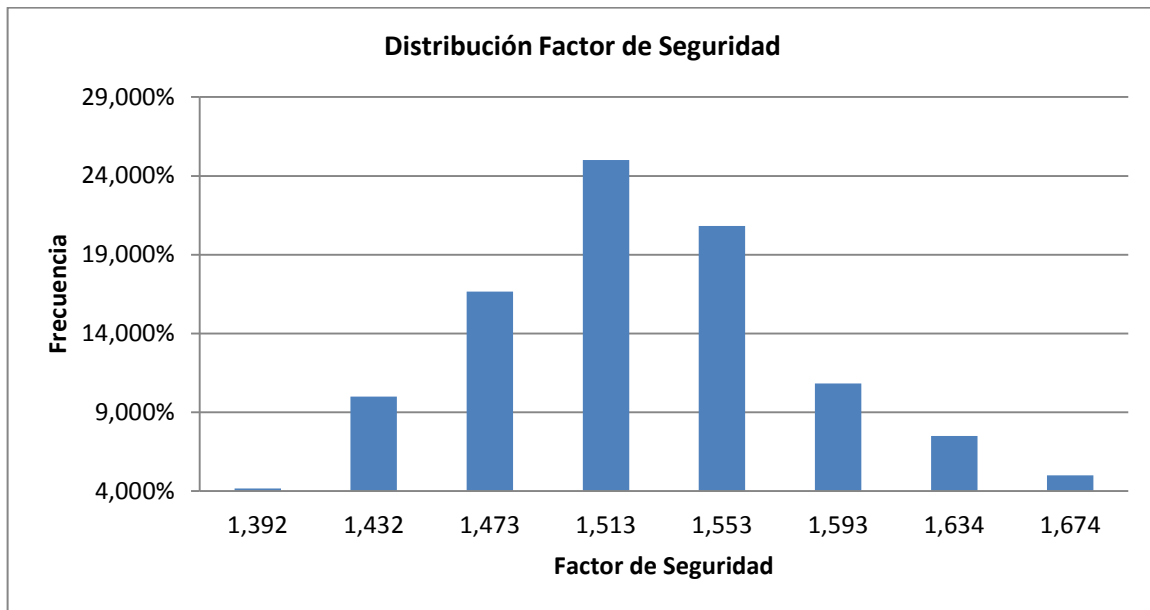


Grafico No. 5.13: Histograma de frecuencia vs. Factor de Seguridad. Valores calculados con distribución normal de cohesión y ángulo de fricción.

Del Gráfico No. 5.13 se concluye que los factores de seguridad obtenidos obedecen a una distribución normal y que:

- El valor máximo obtenido es $x_{\max} = 1.674$,
- La media es $\mu = 1.529$
- Desviación estándar calculada $\sigma = 0.07073$
- Aplicando la ecuación de coeficientes de confianza

$$z_c = \frac{x_{\max} - \mu}{\sigma}$$

tenemos que:

$$z_c = \frac{1.674 - 1.529}{0.07073} = 2.05$$

- Relacionando con el cuadro No. 5.8 se tiene que el nivel de confianza es del 96%.

En los gráficos No. 5.14, 5.15 y 5.16 se muestran las proyecciones de las superficies de falla con sus respectivos Factores de Seguridad para la combinaciones N:18, S:18 y N:19. Se eligen estas tres superficies como representación de la muestra porque son los que tienen los Factores de Seguridad más cercanos a la moda o media estadística, que en caso de distribución normal es el mismo valor, que se muestran en el cuadro No. 5.14.

Parámetros geotécnicos utilizados para análisis probabilístico de estabilidad del talud			Factor de seguridad obtenido (FS)
Combinación	Estrato roca II		
	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	
	Rango 294 - 392	Rango 35 - 45	
N:18	336	39.740	1.528
S:18	337	39.740	1.529
N:19	336	39.839	1.531

Cuadro 5.14: Muestra de tres resultados más cercanos a la media estadística obtenidos para Factor de Seguridad variando parámetros geotécnicos con distribución normal.

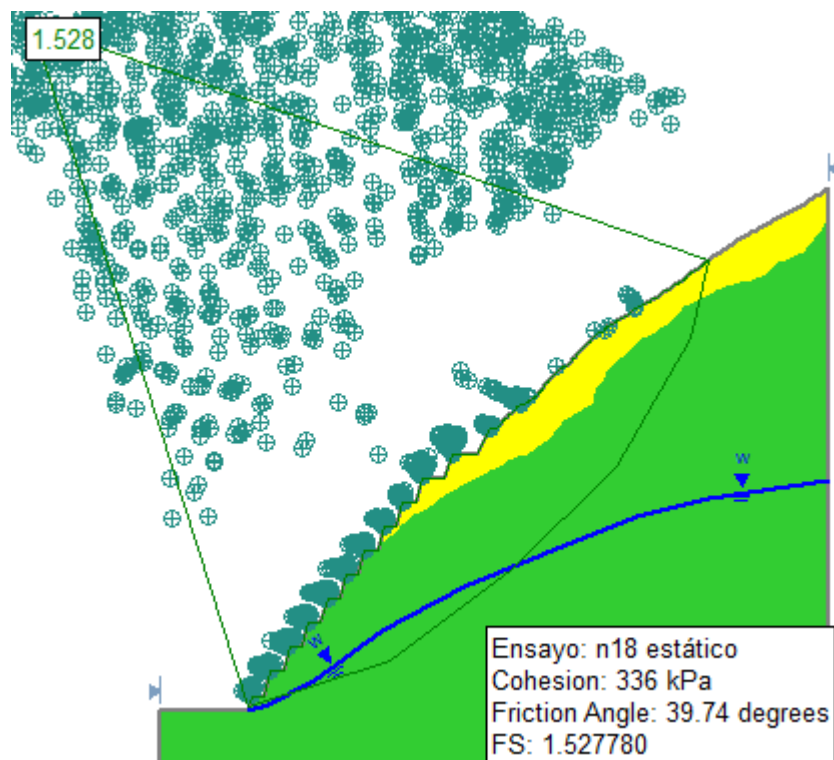


Gráfico No. 5.14 : Superficie de Falla calcula en Slide 5.0, para la combinación de parametros geotécnicos N:18

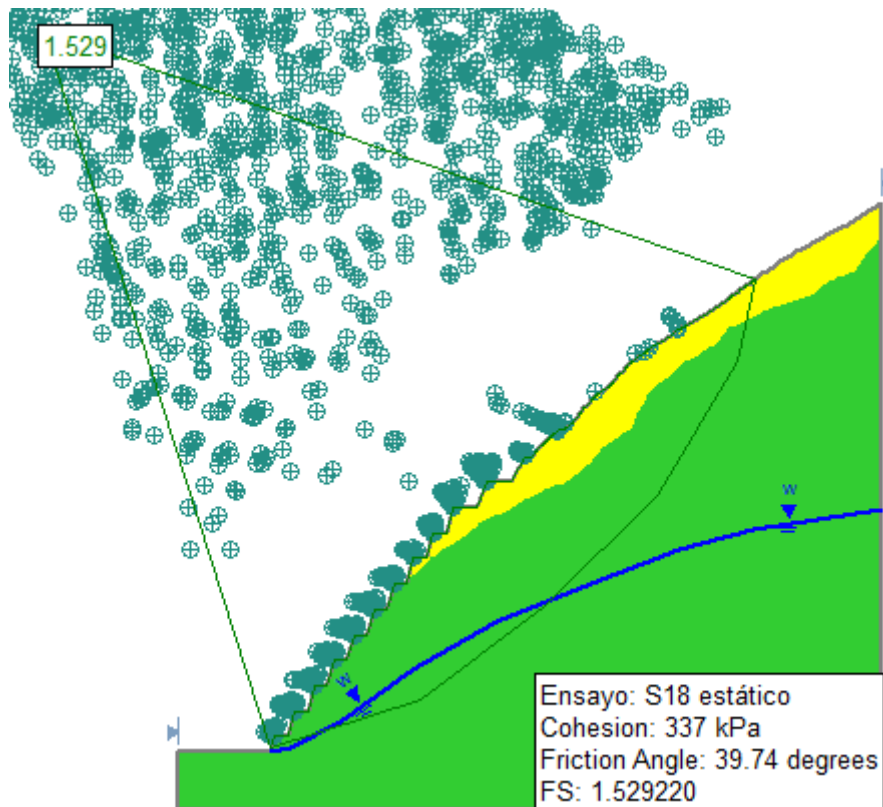


Gráfico No. 5.15 : Superficie de Falla calcula en Slide 5.0, para la combinación de parametros geotécnicos S:18

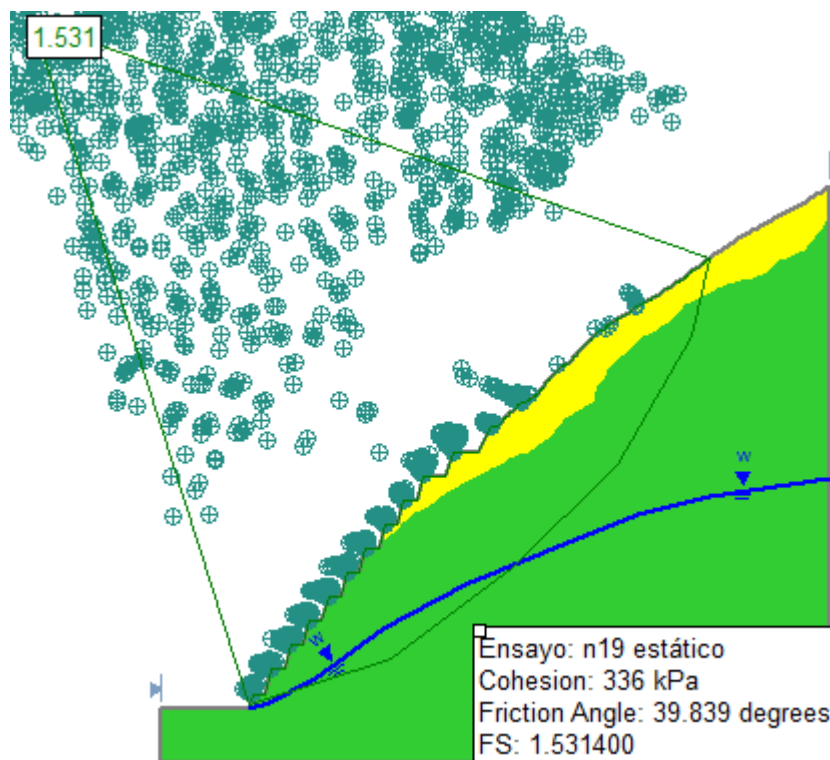


Gráfico No. 5.16 : Superficie de Falla calcula en Slide 5.0, para la combinación de parametros geotécnicos N:19

5.2.4 Resultados análisis de estabilidad determinístico

Se realizó el ensayo determinístico de estabilidad, con los parámetros geotécnicos del estrato de roca indicados en el cuadro No. 5.15, definidos en el capítulo IV obteniendo un Factor de Seguridad de 1.466.

Parámetros geotécnicos para análisis determinístico					Factor de Seguridad Calculado
Probable Litología	Clase roca	Cohesión (KPa)	Fricción (°)	Densidad (gr/cc)	
Roca alterada	III	245	30	2.03	1.466
Roca fresca	II	343	38	2.29	

Cuadro No. 5.15: Parámetros Geotécnicos utilizados para estrato de Roca en análisis Determinístico, con resultado de Factor de seguridad de 1.543

En el gráfico No. 5.17, se muestra el resultado del plano de falla realizado en el programa computacional slide 5.0 con los valores de cohesión y ángulo de fricción del cuadro 5.15.

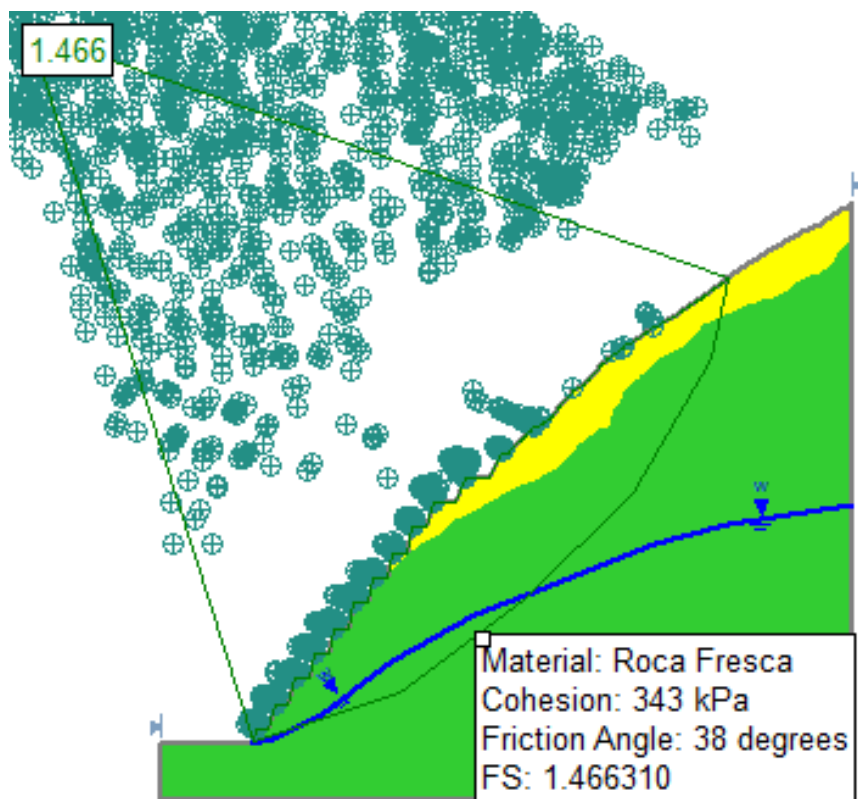


Grafico No. 5.17: Superficie de falla, calculada por Slide 5.0 con datos determinísticos de cohesión y ángulo de fricción.

5.2.5 Resultados análisis de estabilidad con coeficiente sísmico

Con la finalidad de complementar el análisis de estabilidad de talud, se ha realizado un nuevo análisis considerando el factor sísmico definido en el capítulo II y los mismos factores geotécnicos determinados anteriormente. La aceleración sísmica en la zona de estudio es 0.24 g, como se consideró para el diseño de la Central Hidroeléctrica Mazar.

El factor de seguridad obtenido con Slide 5.0 es 1.062 y en el gráfico No. 5.18 se puede observar la superficie de falla calculado para esta condición.

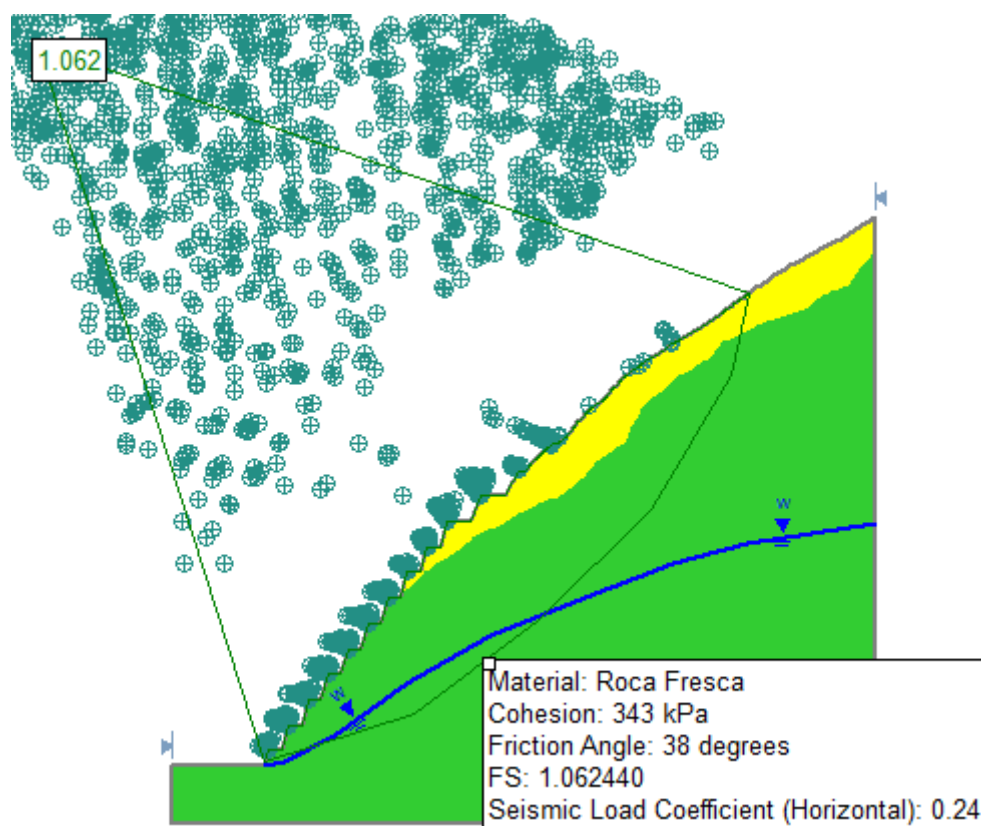


Gráfico No. 5.18: Superficie de falla y Factor de Seguridad del Talud, considerando el coeficiente sísmico de 0.24g en el análisis de estabilidad

5.2.6 Resultados del análisis de estabilidad variando el nivel freático

Con la finalidad de complementar el análisis de estabilidad del talud, se realizó el análisis de estabilidad considerando el más alto nivel freático, concretamente la línea piezométrica que pasaría por el contacto entre los dos estratos, y con los mismos factores geotécnicos determinados anteriormente. De esta forma el factor de seguridad obtenido es 1.063, en el gráfico No. 5.19 se puede observar la superficie de falla calculada para esta condición.

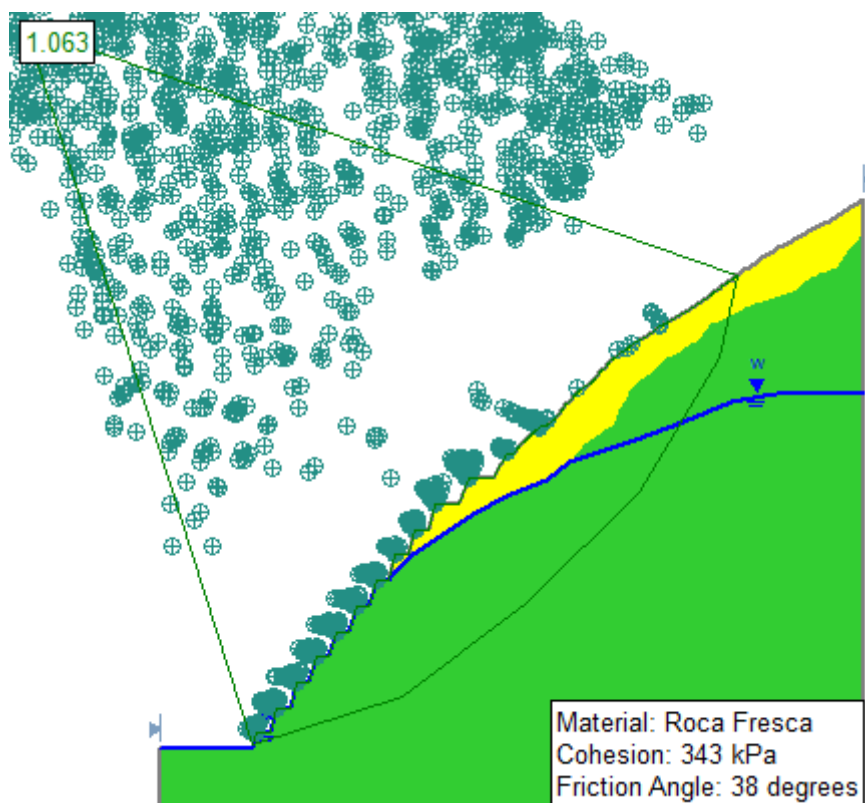


Grafico No. 5.19: Superficie de falla, realizando el análisis de estabilidad considerando nivel freático elevado.

5.3 Cálculo de probabilidades del Factor de Seguridad

El valor mínimo aceptable para el factor de seguridad calculado por estado límite en el análisis de estabilidad de taludes, varía de acuerdo a la importancia de la obra y consecuencias del fallo. Al consultar la siguiente literatura: Estudios y diseños de HIDROPAUTE [1] y [3], Diseño Ejecutivo Manual para Estabilidad de Taludes de la U.S. Army Corps of Engineers [4] y Manual de Mecánica de Suelos y Cimentaciones de Ángel Muelas Rodríguez [9], se recomienda como criterio para el factor de seguridad mínimo el valor de 1.3 para taludes terminados.

Considerando los resultados del escenario 2, debido a que es el que más se asemeja al comportamiento de la naturaleza, se plantearon cinco alternativas para el cálculo probabilístico:

1. Probabilidad de que el factor de seguridad sea mayor que 1.3, cumpliendo con la recomendación de la literatura consultada.
2. Probabilidad de que el factor de seguridad sea mayor que 1.5, factor de seguridad característico asumido por algunos autores para estabilidad de taludes.



3. Probabilidad de que el factor de seguridad sea mayor que 1.466, que es el factor de seguridad obtenido por el método determinístico.
4. Probabilidad de que el factor de seguridad sea mayor a 1.372, que es el mínimo valor obtenido en el muestreo del escenario 2.
5. Probabilidad de que el factor de seguridad sea mayor a 1.674, que es el máximo valor obtenido en el muestreo del escenario 2.

En el cuadro No. 5.16, se muestran los resultados de probabilidad obtenidos para los cinco escenarios planteados, utilizando la tabla de probabilidades de distribución normal.

Cálculo de Probabilidades				
Escenario	x	z	Probabilidad	Característica
1	1,300	-3,24	99,94%	mayores que 1,3
2	1,500	-0,41	65,91%	mayores que 1.5
3	1,466	-0,89	81,33%	mayores que 1.466
4	1,372	-2,22	98,68%	mayores que 1.372
5	1,674	2,05	97,98%	menores que 1.674

Cuadro No. 5.16 Probabilidad de ocurrencia para Factores de Seguridad planteados.



CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones para el talud sobre el vertedero de la central Mazar son:

- En base a los datos recopilados de estudios geológicos, geomorfológicos, tectónicos, riesgo sísmico, litológicos, estratigráficos e hidrológicos además de la correlación de la capas geológicas con el monitoreo realizado, se logró modelar y determinar un rango de datos de los parámetros geotécnicos considerados importantes como son la cohesión y el ángulo de fricción del estrato rocoso tipo II, para obtener una perspectiva del comportamiento del talud a través del análisis probabilístico.
- En las bermas de estabilización del vertedero, los movimientos registrados en los inclinómetros son mínimos en sub-suelo y mayores en superficie con desplazamientos similares a los medidos en las pilas topográficas, con sus movimientos más relevantes a mitad del talud.
- Los resultados de los diferentes análisis de estabilidad realizados demuestran que el talud es estable, inclusive para el caso de situaciones críticas como sismos o elevación del nivel freático. Aunque se debe considerar que la saturación es un factor de riesgo para la estabilidad, a pesar de que el análisis da como resultado que el talud se mantendría estable en caso de cierto grado de saturación. El Factor de Seguridad obtenido para esta condición disminuye de manera considerable. Por lo que al ser una zona de alta pluviosidad es necesario mantener la impermeabilidad de la superficie del talud con el concreto lanzado, el mantenimiento de zanjas de coronación y evacuación de agua.
- La probabilidad, con los datos obtenidos, de que el talud cumpla con el factor de seguridad de diseño, es decir, mayor a 1,3, es de 99.94%. Interpretando los resultados se puede indicar que a pesar de la heterogeneidad de los parámetros geotécnicos que pueda existir en el macizo, el talud es estable y seguro y cumple con las especificaciones de diseño.
- Las superficies de falla obtenidas en el análisis de estabilidad mediante el programa computacional slide 5.0 cumplen con la hipótesis de que se dan en estrato de roca caracterizada como tipo II.



Las conclusiones para el análisis probabilístico son:

- La precisión en la estimación de los parámetros geotécnicos que se asumen para el análisis interviene directamente en la confianza que se tiene en los resultados proyectados.
- Para el análisis probabilístico se debe tener especial cuidado en el tipo de función asumida para la distribución estadística de los valores geotécnicos que representan la muestra.
- La metodología probabilística para el análisis de estabilidad de taludes proporciona resultados que contienen una información más completa y cercana a la realidad, lo que permite mejorar el nivel de seguridad asumido para el diseño.
- Los resultados obtenidos para el Factor de Seguridad en el escenario 2, con datos que obedecen a distribución normal, tienen un rango de confiabilidad del 96%.

Recomendación para futuras líneas de investigación:

- Realizar el análisis de estabilidad en roca por vuelco, cuña y falla plana, considerando direcciones y los parámetros geotécnicos de diaclasas y fallas del macizo.
- Realizar el análisis probabilístico del talud, tomando como un factor de variación el nivel freático.
- Obtener muestras de campo y realizar pruebas laboratorio para determinar los parámetros geotécnicos característicos del talud y estimar los rangos de variación, la distribución estadística a la que obedecen y realizar el análisis probabilístico de su factor de seguridad.



Referencia bibliográfica:

- [1] Sweco International AB - BotConsult Cía. Ltda. (1998). Informe Final para Construcción del Proyecto Hidroeléctrico Mazar.
- [2] Central Hidroeléctrica Mazar (2012). Monitoreo Civil Informe.
- [3] Consorcio Gerencia Mazar (2006). Diseño Ejecutivo 2217-MC-V14-002-a, Presa Mazar.
- [4] U.S. Army Corps of Engineers. Slope Stability Manual.
- [5] INECEL (2006), Informe Final, Geología Ecuador
- [6] Nuñez del Arco E. (2003). Geología del Ecuador
- [7] Lojano, Janeth. (2010). Tesis Maestría en Geología Aplicada y Geotecnia: Análisis de la Estabilidad Global del Talud Izquierdo del Cuenco Amortiguador de la Presa Mazar”.
- [8] INECEL, (2005). Estudios Geofísicos métodos: Sísmica de refracción y Resistividad Eléctrica.
- [9] Muelas Rodríguez, A. (2011). Manual de Mecánica de Suelos y Cimentaciones.
- [10] González de Vallejo, L. Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2005). Ingeniería Geológica. Prentice Hall
- [11] El Ramly, H., Morgenstern, N., & Cruden, D. (2006). Lodaden Slide: a probabilistic assessment. Canadian Geotechnical Journal.
- [12] Suarez, J., (2009). Deslizamientos, Análisis Geotécnico.
- [13] HIDROPAUTE, (2009). Estudios de las Obras de Estabilización del deslizamiento Ermita – Sur.
- [14] Kerguelen, A., (2009). Análisis Probabilístico de Estabilidad de Taludes.
- [15] Ruiz, S. (2010). Análisis de Decisiones.
- [16] Suarez, J. (2009). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Suelos Tropicales.
- [17] Murray R. y Spiegel, Marchal, W. (1980). Estadística, McGraw-Hill.
- [18] García, E. (2007). Informe Comisión Estructural Colegio de Arquitectos del Azuay. p.12
- [19] Red Sísmica del Austro, (1998). Proyecto PRECUPA (Prevención de Riesgos Naturales en la Cuenca del Paute), Capítulo D, Sismología, pp. D21-D30
- [20] Ubicación Proyecto Paute Integral (s.f.). Recuperado el 18 de septiembre del 2014 de <https://www.fiec.espol.edu.ec>
- [21] Central Mazar (s.f.). Recuperado el 18 de septiembre del 2014 de <https://www.celec.gob.ec>.
- [22] Estabilidad de taludes en rocas (s.f.). Recuperado el 23 de septiembre del 2014 de <http://materias.fi.uba.ar>



ANEXOS:



Anexo No. 01

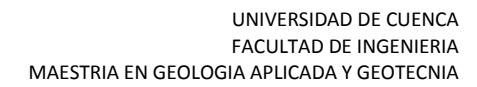
Emplazamiento de la Central Hidroeléctrica Mazar [1]





Anexo No. 02

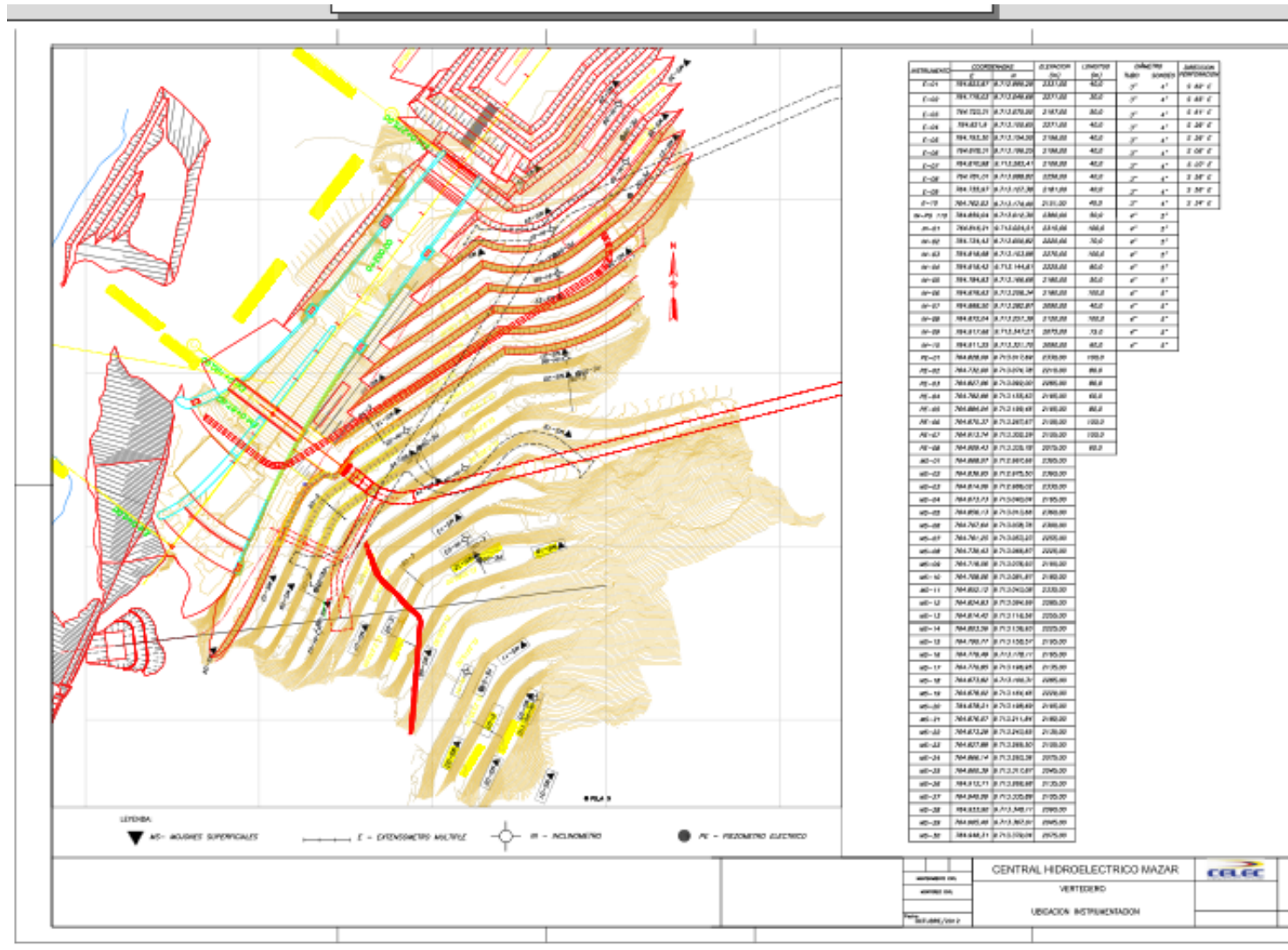
Mapa geológico zona Central Hidroeléctrica Mazar [1].





Anexo No. 03

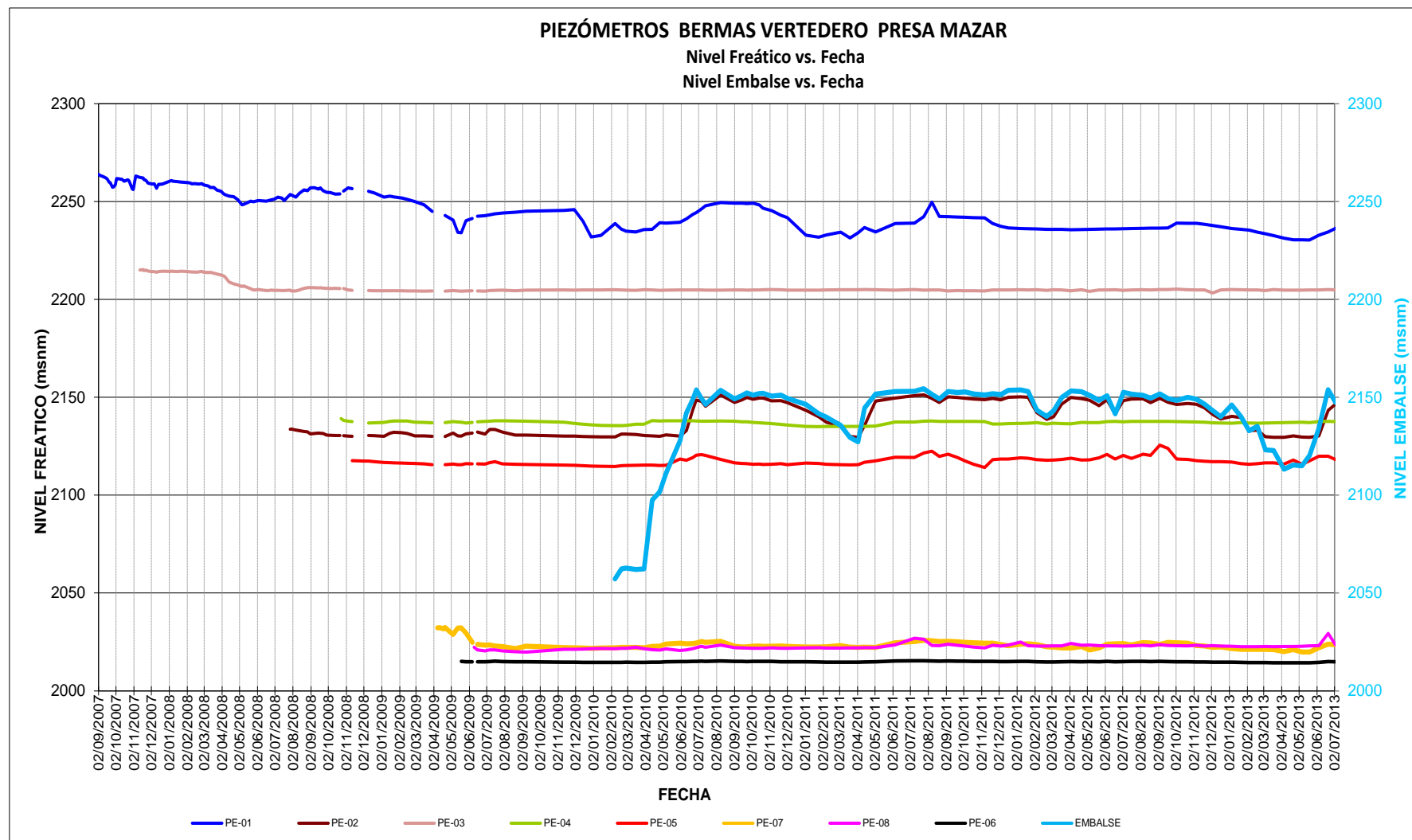
Mapa de Ubicación del Monitoreo del Talud sobre el Vertedero [2].





Anexo No. 04

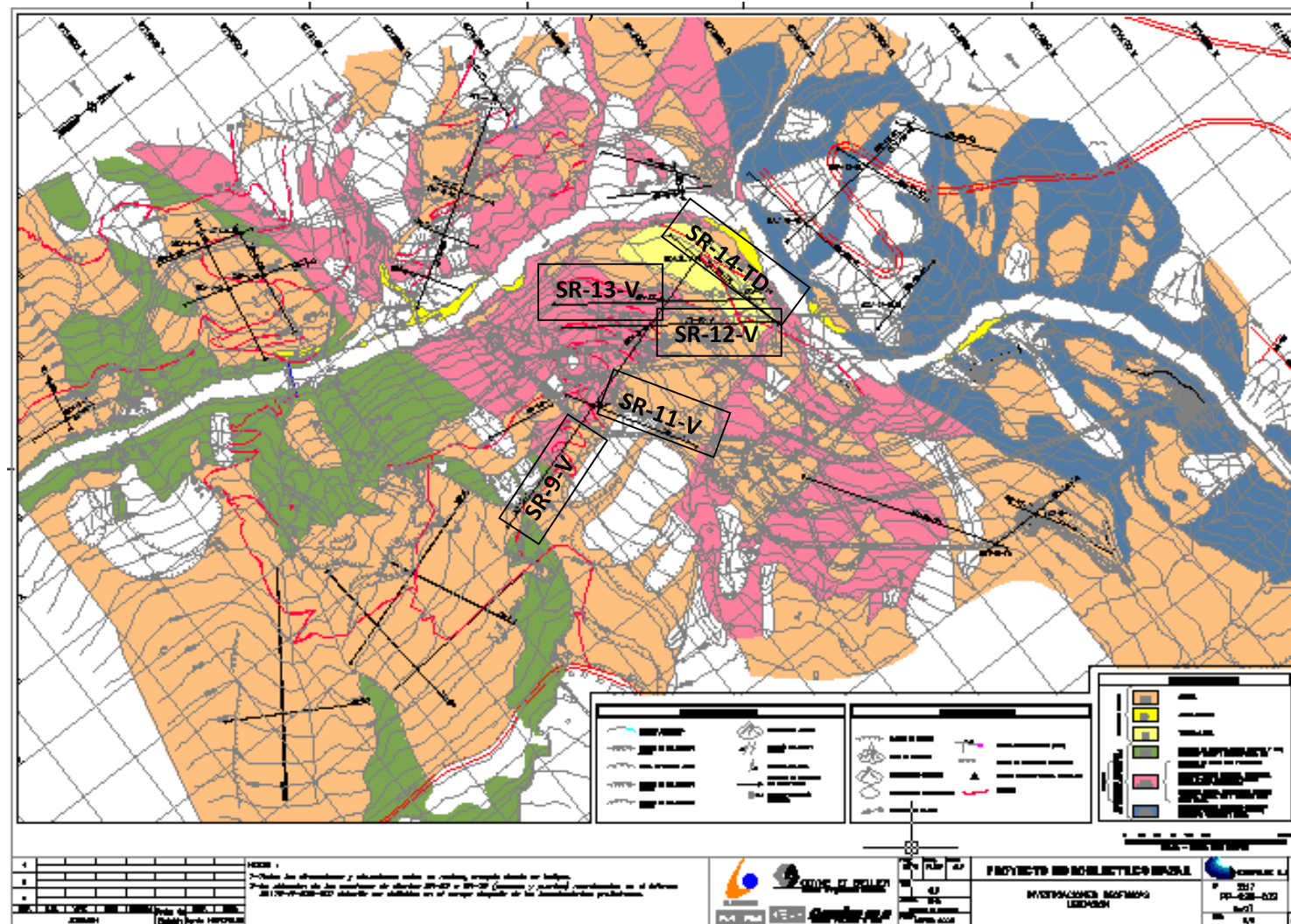
Gráfico de registro histórico de Piezómetros y relación con el embalse [2].





Anexo No. 05

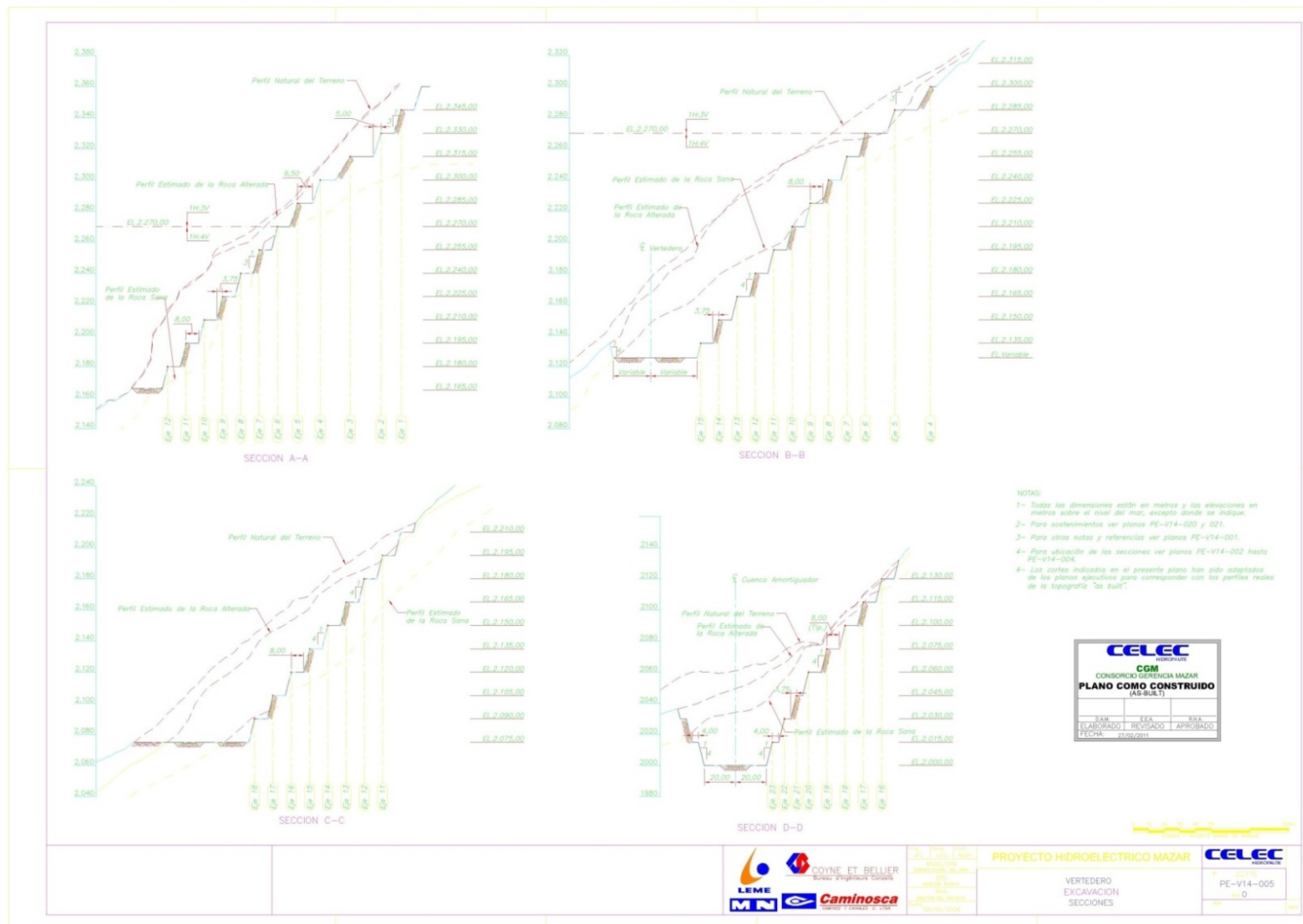
Ubicación Sondeos Eléctricos y perfiles sísmicos [1].





Anexo No. 06

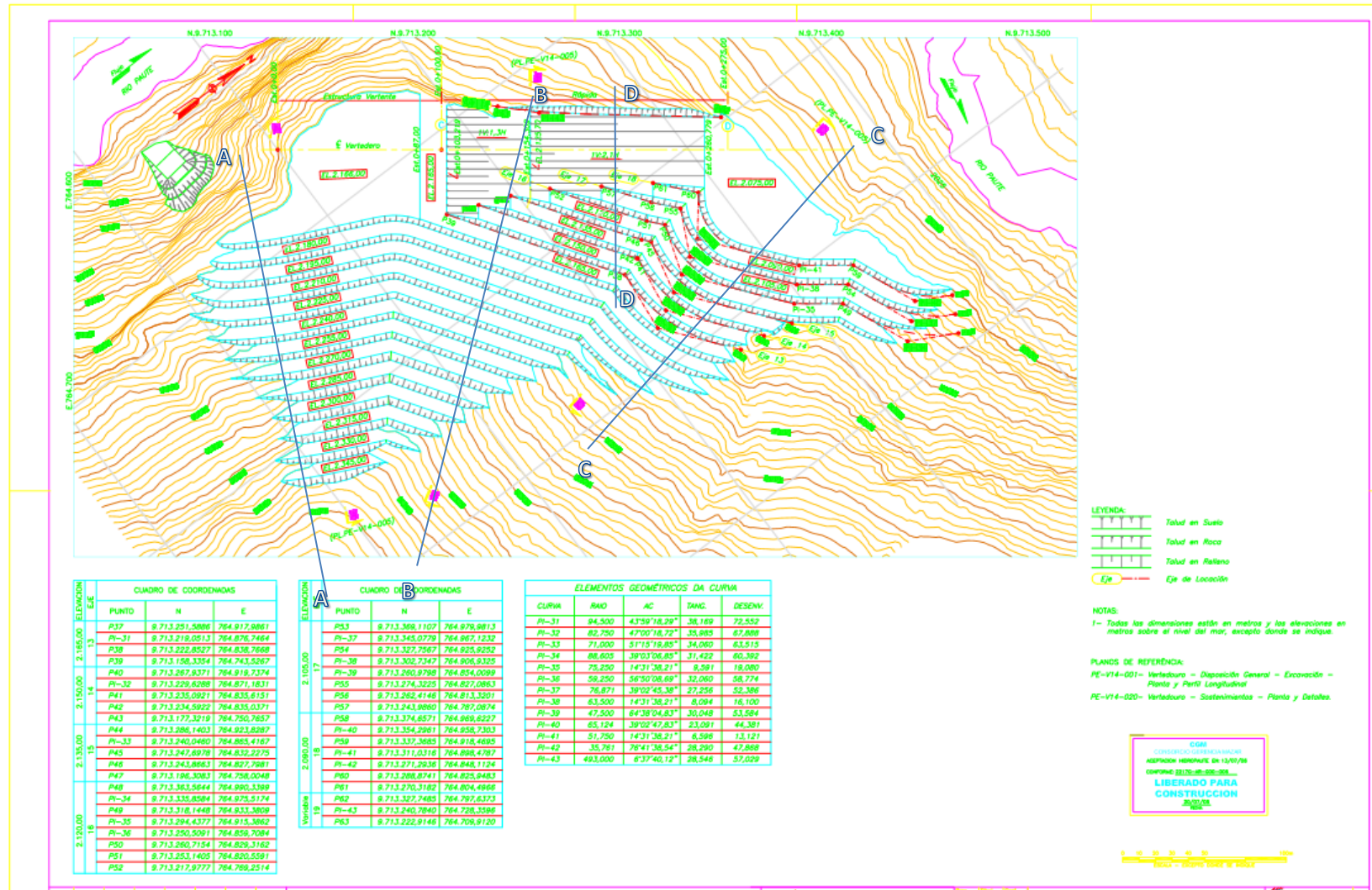
Perfiles Característicos del Talud sobre el Vertedero [1].





Anexo No. 07

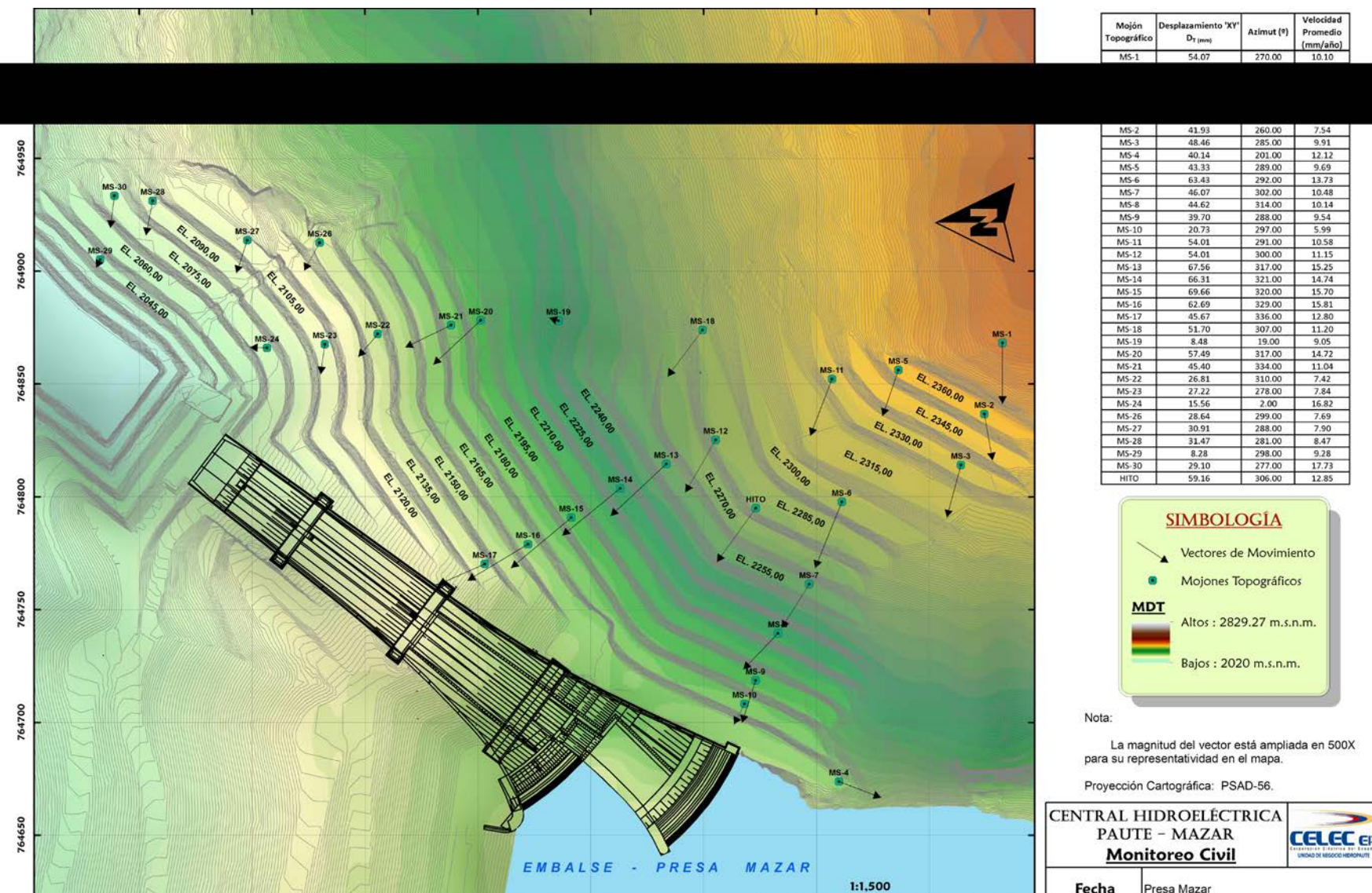
Ubicación en Planta de Perfiles Característicos [1].





Anexo No. 08

Vectores de Movimiento, Control Topográfico [2].



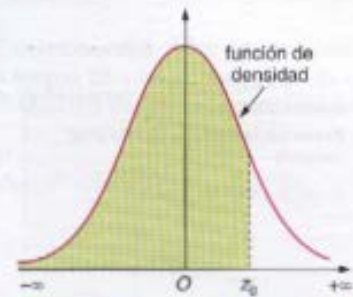


Anexo No. 09

Tabla de Distribución Normal [17].

TABLA DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL $N(0, 1)$

$$P(Z \leq z_0) = \left\{ \begin{array}{l} \text{área del recinto} \\ \text{coloreado} \end{array} \right\}$$



z_0	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5239	.5279	.5319	.5359
0.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5557	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
0.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
0.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
0.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
0.5	.6915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
0.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
0.7	.7580	.7611	.7642	.7673	.7704	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
0.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
0.9	.8159	.8186	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9066	.9082	.9099	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9222	.9236	.9251	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9357	.9370	.9382	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9474	.9484	.9495	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9554	.9564	.9573	.9582	.9591	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9646	.9656	.9664	.9671	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9726	.9732	.9738	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767
2.0	.9772	.9778	.9783	.9788	.9793	.9798	.9803	.9808	.9812	.9817
2.1	.9821	.9826	.9830	.9834	.9838	.9842	.9846	.9850	.9854	.9857
2.2	.9861	.9864	.9868	.9871	.9875	.9878	.9881	.9884	.9887	.9890
2.3	.9893	.9896	.9898	.9901	.9904	.9906	.9909	.9911	.9913	.9916
2.4	.9918	.9920	.9922	.9925	.9927	.9929	.9931	.9932	.9934	.9936
2.5	.9938	.9940	.9941	.9943	.9945	.9946	.9948	.9949	.9951	.9952
2.6	.9953	.9955	.9956	.9957	.9959	.9960	.9961	.9962	.9963	.9964
2.7	.9965	.9966	.9967	.9968	.9969	.9970	.9971	.9972	.9973	.9974
2.8	.9974	.9975	.9976	.9977	.9977	.9978	.9979	.9979	.9980	.9981
2.9	.9981	.9982	.9982	.9983	.9984	.9984	.9985	.9985	.9986	.9986
3.0	.9987	.9987	.9987	.9988	.9988	.9989	.9989	.9989	.9990	.9990
3.1	.9990	.9991	.9991	.9991	.9992	.9992	.9992	.9992	.9993	.9993
3.2	.9993	.9993	.9994	.9994	.9994	.9994	.9994	.9995	.9995	.9995
3.3	.9995	.9995	.9995	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9997
3.4	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9998
3.6	.9998	.9998	.9999	.9999	.9999	.9999	.9999	.9999	.9999	.9999